

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

## DIPLOMSKI RAD

Josip Ribarić

Zagreb, 2008

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

## DIPLOMSKI RAD

Mentor  
Mladen Šercer

Josip Ribarić

Zagreb, 2008

## ZAHVALA

Ovaj rad rađen je pod stručnim vodstvom prof.dr.sc. Mladena Šercera, kojem iskreno zahvaljujem na pruženoj pomoći i korisnim savjetima.

Također zahvaljujem dr.sc. Damiru Godecu, koji je sudjelovao u svakom koraku izrade ovog rada, na stručnosti, uloženom trudu i pruženoj pomoći, gospodinu Alešu Marinčiću iz tvrtke LIV, Postojna na pomoći u odabiru literature, kolegi Marku Cukonu na pomoći oko izrade 3D modela.

Zahvaljujem mojoj obitelji i djevojki Martini na podršci i razumijevanju koje su mi pružali tijekom studija i za vrijeme pisanja ovog diplomskog rada.

## SAŽETAK

U radu je opisan postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode. Za primjenu ovog postupka razvijen je otpresak u obliku crijepa.

Pri razradi proizvoda i konstrukciji otpreska i kalupa korišten je programski paket CATIA, te standardni dijelovi tvrtke HASCO.

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, uz korištenje navedene literature i konzultacija.

Josip Ribarić

---

## SADRŽAJ:

|   |     |
|---|-----|
| POPIS SLIKA:  | III |
| POPIS TABLICA:  | V   |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA   | VI  |
| POPIS KORIŠTENIH KRATICA  | IX  |
| 1. UVOD   | 1   |
| 2. UVOD U POSTUPAK INJEKCIJSKOG PREŠANJA S POMOĆU VODE  | 2   |
| 2.1. Postupak s djelomičnim ubrizgavanjem vode (short-shot) <sup>3</sup>                      | 3   |
| 2.2. Postupak s preljevajućom šupljinom (overflow cavity) <sup>3</sup>                        | 4   |
| 2.3. Postupak povratnog tečenja taljevine (push back) <sup>3</sup>                            | 5   |
| 2.4. Postupak s protokom vode kroz unutrašnjost proizvoda (closed loop) <sup>3</sup>          | 5   |
| 3. ULOGA KAPLJEVINE U PROCESU   | 7   |
| 3.1. Problemi kod dijelova s razdvojenom ili prstenastom geometrijom <sup>1</sup>             | 9   |
| 3.2. Planiranje pokusa i njihova provedba <sup>1</sup>  | 11  |
| 3.3. Stvaranje šupljine pomoću vodenog tlaka <sup>1</sup>                                     | 13  |
| 3.4. Utjecaj vodenog tlaka na skupljanje proizvoda <sup>1</sup>                               | 16  |
| 3.5. Vitoperenje <sup>1</sup>   | 17  |
| 3.6. Proces ubrizgavanja vode <sup>2</sup>  | 18  |
| 3.7. Naprave i injektori za ubrizgavanje vode <sup>2</sup>                                    | 19  |
| 3.8. Optimiranje prodiranja vode <sup>4</sup>   | 21  |
| 3.9. Ponašanje vodene penetracije u proizvodima <sup>4</sup>                                  | 26  |
| 3.10. Temperaturni profil proizvoda <sup>4</sup>  | 27  |
| 3.11. Orijentacija vlakana u proizvodima <sup>4</sup>   | 27  |
| 3.12. Dobivanje dijagrama injekcijskog prešanja s pomoću vode <sup>4</sup>                    | 28  |
| 3.13. Ponašanje vode i materijala kod injekcijskog prešanja s pomoću vode <sup>5</sup>        | 30  |
| 3.14. Utjecaj parametara preradbe <sup>5</sup>  | 37  |
| 3.15. Utjecaj geometrije vodenih kanala i debljine stijenke proizvoda <sup>5</sup>            | 41  |
| 3.16. Mikroskopsko ispitivanje kompozitnih otpresaka <sup>5</sup>                             | 42  |
| 3.17. Mehanizam formiranja vodenih mjehurića <sup>5</sup>                                     | 43  |
| 3.18. Greške na proizvodima koje nastaju pri injekcijskom prešanju s pomoću vode <sup>2</sup> | 46  |
| 3.19. Dostignuća svjetskih proizvođača opreme za injekcijsko prešanje                         | 48  |
| 3.19.1. Postupak Watermelt <sup>3</sup>   | 48  |
| 3.19.2. Postupak Aquamould <sup>3</sup>   | 49  |
| 4. RAZVOJ PROIZVODA <sup>6</sup>  | 51  |
| 4.1. Tijek procesa konstruiranja <sup>6</sup>   | 55  |
| 4.2. Izbor materijala <sup>6</sup>  | 55  |
| 4.3. Lista zahtjeva za crijep kolektor  | 57  |
| 4.4. Proizvodno oblikovanje otpreska <sup>7</sup>   | 58  |
| 4.4.1. Oblikovanje s obzirom na fazu volumnog popunjavanja kalupne šupljine polimerom         | 59  |
| 4.4.2. Faza djelovanja vode i naknadnog tlaka vode  | 61  |
| 4.4.3. Faza uklanjanja vode   | 64  |
| 4.4.4. Faza pečenja uljevnog sustava  | 64  |
| 4.4.5. Faza vađenja otpreska iz kalupne šupljine <sup>9</sup>                                 | 64  |
| 4.5. Konačni oblik proizvoda  | 65  |
| 5. SIMULACIJA NAPREZANJA I DEFORMACIJA MODELA CRIJEPA I ANALIZA REZULTATA                     | 69  |
| 5.1. Izbor materijala proizvoda   | 69  |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.2. | Simulacija naprezanja i deformacija crijepa u programskom paketu CATIA .....               | 71 |
| 5.3. | Zaključak o simulaciji naprezanja i deformacija proizvoda u programskom paketu CATIA ..... | 76 |
| 6.   | BRZA IZRADBA PROTOTIPOVA.....  | 77 |
| 6.1. | Kratki uvod u postupak <sup>12</sup> .....   | 77 |
| 6.2. | Opis načina rada stroja za brzu izradbu prototipova Objet-Eden 330.....                    | 79 |
| 7.   | PRORAČUN CIJENE KOŠTANJA OTPRESKA .....  | 81 |
| 7.1. | Osnovni podaci.....  | 81 |
| 7.2. | Troškovi konstruiranja .....   | 82 |
| 7.3. | Troškovi izradbe kalupa .....  | 83 |
| 7.4. | Troškovi prototipne serije .....   | 84 |
| 7.5. | Troškovi probne (nulte) serije .....   | 85 |
| 7.6. | Troškovi proizvodnje .....   | 87 |
| 7.7. | Prosječna cijena otpreska probne (nulte) i proizvodne serije.....                          | 88 |
| 7.8. | Troškovi održavanja za jedan otpresak .....  | 88 |
| 7.9. | Konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku .....                                       | 89 |
| 8.   | ZAKLJUČAK .....  | 90 |
| 9.   | POPIS LITERATURE .....   | 91 |
| 10.  | PRILOG .....   | 92 |

## POPIS SLIKA:

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1. Proizvodi dobiveni GIT i WIT postupcima <sup>2</sup>  | 2  |
| Slika 2.2. Prikaz procesa "Short-shot" <sup>3</sup>  | 3  |
| Slika 3.1. Širenje vodenog mjehura <sup>1</sup>  | 8  |
| Slika 3.2. Slika proizvoda (testni primjerci na IKV institutu) <sup>1</sup>  | 9  |
| Slika 3.3. Razlike u širenju taljevine i vode u okviru reketa <sup>1</sup>   | 10 |
| Slika 3.4. Kalupna ploča za pračku <sup>1</sup>  | 12 |
| Slika 3.5. Prikaz procesa s djelomičnim ubrizgavanjem vode <sup>1</sup>  | 12 |
| Slika 3.6. Ovisnost dužine kraka o materijalu <sup>1</sup>   | 14 |
| Slika 3.7. Prosječne vrijednosti tlaka vode u kalupnoj šupljini za vrijeme oblikovanja proizvoda <sup>1</sup>  | 14 |
| Slika 3.8. Položaj linije spajanja (PP GF 20) <sup>1</sup>   | 16 |
| Slika 3.9. Utjecaj tlaka na skupljanje kod pračke (PA 6 GF 15) <sup>1</sup>  | 17 |
| Slika 3.10. Ovisnost vitoperenja i vodenog tlaka <sup>1</sup>  | 18 |
| Slika 3.11. Injektori za ubrizgavanje vode <sup>2</sup>  | 20 |
| Slika 3.12. Tlocrt pokusnog kalupa <sup>4</sup>  | 25 |
| Slika 3.13. Udio šupljine na presjecima <sup>4</sup>   | 26 |
| Slika 3.14. Zatvaranje kanala <sup>4</sup>   | 26 |
| Slika 3.15. Temperaturni profili kod različitih tehnika prešanja <sup>4</sup>  | 27 |
| Slika 3.16. Orijentacija vlakana: a) rubno područje kalup-polimer b) jezgra proizvoda c) rubno područje voda- polimer <sup>4</sup>                               | 28 |
| Slika 3.17. Dijagram injekcijskog prešanja s pomoću vode <sup>4</sup>  | 29 |
| Slika 3.18. Dijagram injekcijskog prešanja s pomoću vode za ojačani polipropilen <sup>4</sup>  | 30 |
| Slika 3.19. Prikaz modela s rebrom: a) konvencionalno injekcijsko prešanje, b) injekcijsko prešanje s pomoću vode, c) stvaranje neželjenih šupljina <sup>5</sup> | 31 |
| Slika 3.20. Prikaz pločice na kojoj su provedeni pokusi <sup>5</sup>   | 32 |
| Slika 3.21. Oblici presjeka rebara <sup>5</sup>  | 33 |
| Slika 3.22. Redoslijed grana i područja vodenog nabiranja <sup>5</sup>   | 34 |
| Slika 3.23. Utjecaj temperature taljevine i temperature stijenke kalupne šupljine na svojstva otpresaka.....   | 38 |
| Slika 3.24. Utjecaj temperature i tlaka vode na svojstva otpresaka .....   | 39 |
| Slika 3.25. Utjecaj vremena odgode i puta doziranja na svojstva otpresaka .....  | 40 |
| Slika 3.26. Postotak greške u ovisnosti o obliku rebra.....  | 41 |
| Slika 3.27. Mikroskopski prikaz strukture unutarnjeg kanala <sup>5</sup> .....   | 42 |
| Slika 3.28. Ovisnost dužine vodenih mjehura o udjelu šuplje jezgre za različite materijale <sup>5</sup> .....  | 44 |
| Slika 3.29. Zavisnost dužine vodenih mjehura o udjelu šuplje jezgre za različite tipove rebara <sup>5</sup> ....   | 45 |
| Slika 3.30. Ovisnost dužine vodenih mjehura o udjelu šuplje jezgre za različite omjere visine i debljine stijenka <sup>5</sup> .....                             | 46 |
| Slika 3.31. Oblici grešaka pri injekcijskom prešanju s pomoću vode.....  | 47 |
| Slika 3.32. Cijev za sustav hlađenja u automobilu <sup>3</sup> .....   | 48 |
| Slika 3.33. Shematski prikaz <i>Aquamould</i> postupka <sup>3</sup> .....  | 49 |
| Slika 3.34. Primjeri <i>Aquamould</i> postupka <sup>3</sup> .....  | 50 |
| Slika 4.1. Crna kutija <sup>6</sup> .....  | 51 |
| Slika 4.2. Konstrukcija kao sustav u kojem se vrši pretvorba veličina <sup>6</sup> .....   | 52 |
| Slika 4.3. Kompleksnost izbora materijala <sup>6</sup> .....   | 56 |
| Slika 4.4. Oblik glinenog crijeva.....   | 66 |
| Slika 4.5. Izgled kuglastih zglobova za dovod i odvod vode na polimernom crijevu .....   | 66 |
| Slika 4.6. Detalj sklopa pokrova .....   | 67 |



|   |    |
|---|----|
| Slika 4.7. Detalj presjeka crijepova u sklopu .....                               | 68 |
| Slika 5.1. Prikaz modela prije simulacije .....                                   | 71 |
| Slika 5.2. Model s mrežom konačnih elemenata .....                                | 72 |
| Slika 5.3. Lokalna greška J.....  | 73 |
| Slika 5.4. Prikaz vektora pomaka.....   | 74 |
| Slika 5.5. Prikaz naprezanja na crijepu .....                                     | 75 |
| Slika 6.1. Primjeri prototipnih tvorevina <sup>13</sup> .....                     | 77 |
| Slika 6.2. Primjer djela dobivenog brzom izradbom prototipova <sup>13</sup> ..... | 79 |
| Slika 6.3. Prozor programa za brzu izradbu prototipova <sup>13</sup> .....        | 80 |

## POPIS TABLICA:

|   |    |
|---|----|
| Tablica 3.1. Vrste postupaka kod proizvodnje reketa i praćke <sup>1</sup> .....                     | 13 |
| Tablica 3.2. Vrijednosti parametara po razinama <sup>4</sup> .....                                  | 22 |
| Tablica 3.3. Plan pokusa <sup>4</sup> .....   | 23 |
| Tablica 3.4. Rezultati prodiranja vode na polipropilenu s 20 % staklenih vlakana <sup>4</sup> ..... | 24 |
| Tablica 3.5. Podaci o izvedenim pokusima <sup>5</sup> .....   | 36 |
| Tablica 4.1. Lista zahtjeva za crijep kolektor.....   | 57 |
| Tablica 5.1. Svojstva materijala (Borealis) <sup>10</sup> .....                                     | 70 |

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

| Oznaka           | Veličina  | Jedinica               |
|------------------|---|------------------------|
| $A$              | -površina preko koje se odvija toplinski tok            | $m^2$                  |
| $a_1$            | -koeficijent jednadžbe pravca $a_{ef}$ za PP            | $m^2s^{-1}K^{-1}$      |
| $a_{ef}$         | -koeficijent toplinske difuznosti                       | $m^2/s$                |
| $A_m$            | -stvarni jedinični utrošak materijala                   | kg                     |
| $A_{Mjehura}$    | -površina vodenog mjehura izvan i unutar proizvoda      | $mm^2$                 |
| $A_{Skupljanja}$ | -površina vodenog mjehura unutar proizvoda              | $mm^2$                 |
| $B$              | -stvarni jedinični gubici materijala zbog škarta        | kg                     |
| $b_1$            | -koeficijent jednadžbe pravca $a_{ef}$ za PP            | $m^2s^{-1}$            |
| $b_k$            | -toplinska prodornost materijala kalupa                 | $Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$ |
| $b_p$            | -toplinska prodornost PP s 30% staklenih vlakana        | $Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$ |
| $c$              | -toplinski kapacitet polipropilena                      | J/kgK                  |
| $C_{0serO}$      | -trošak održavanja za jedan otpresak                    | kn/kom                 |
| $C_b$            | -jedinična cijena boje                                  | kn                     |
| $C_{iz}$         | -prosječna cijena radnog sata obradbe                   | kn                     |
| $C_{KOT}$        | -trošak konstruiranja po jednom otpresku                | kn/kom                 |
| $C_m$            | -ukupna jedinična cijena materijala                     | kn                     |
| $C_{mKS}$        | -ukupni trošak materijala za jednu prototipnu seriju    | kn                     |
| $C_{mO}$         | -cijena materijala za jedan otpresak probne serije      | kn/kom                 |
| $C_{mPS}$        | -cijena materijala za probnu seriju                     | kn                     |
| $C_{mPS}$        | -cijena materijala za proizvodnu seriju                 | kn                     |
| $C_O$            | -konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku         | kn/kom                 |
| $C_{om}$         | -jedinična cijena osnovnog materijala                   | kn/kg                  |
| $C_{OPS}$        | -proizvodna cijena jednog otpreska                      | kn/kom                 |
| $C_{osKS}$       | -predviđeni troškovi dorade za prototipnu seriju        | kn                     |
| $C_{osTO}$       | -predviđeni troškovi obradbe                            | kn                     |
| $C_{PRO}$        | -prosječna cijena otpreska                              | kn/kom                 |
| $C_r$            | -cijena regenerata                                      | kn                     |
| $C_{ra}$         | -cijena radnog sata radnika                             | kn/h                   |
| $C_{rKS}$        | -troškovi radne snage                                   | kn                     |
| $C_{rO}$         | -trošak rada za jedan otpresak                          | kn/kom                 |
| $CR_{Prosječno}$ | -prosječni omjer šuplje jezgre                          | -                      |
| $C_{rPS}$        | -ukupni trošak rada za probnu seriju                    | kn                     |
| $C_{sKS}$        | -ukupni trošak ubrizgavalice za jednu prototipnu seriju | kn                     |
| $C_{sO}$         | -cijena ubrizgavalice za jedan otpresak                 | kn/kom                 |
| $C_{sPRS}$       | -cijena ubrizgavalice za proizvodnu seriju              | kn                     |
| $C_{sPS}$        | -cijena ubrizgavalice za probnu seriju                  | kn                     |
| $C_u$            | -cijena radnog sata ubrizgavalice                       | kn/h                   |
| $F_{Dijela}$     | -postotak skupljanja                                    | %                      |
| $FL_{Prosječno}$ | -prosječna dužina skupljanja                            | mm                     |
| $G_{or}$         | -organizacijski gubici prototipne serije                | h                      |
| $K_o$            | -koeficijent oblika (ploča)                             | -                      |
| $L_i$            | -dužina pojedinog vodenog kanala                        | mm                     |
| $L_{Vode}$       | -ukupna dužina svih vodenih kanala                      | mm                     |

|             |   |                   |
|-------------|---|-------------------|
| $m_{ck}$    | -masa crijepa kolektora   | kg                |
| $m_g$       | -masa grozda  | kg                |
| $m_o$       | -masa otpreska  | g                 |
| $m_p$       | -masa polimera  | kg                |
| $m_{pc}$    | -masa punog crijepa   | kg                |
| $m_s$       | -masa polimera šupljine   | kg                |
| $m_{us}$    | -masa uljevnog sustava  | kg                |
| $n$         | -broj mjerenja u svakom pokusu                                  | -                 |
| $n_p$       | -veličina serije  | kom               |
| $n_{ps}$    | -planirani broj prototipnih serija                              | -                 |
| $n_r$       | -broj radnika   | -                 |
| $n_{serPS}$ | -veličina prototipne serije                                     | kom               |
| $n_{uk}$    | -ukupna količina otpresaka                                      | kom               |
| $Q$         | -energija potrebna za grijanje polimera                         | kJ                |
| $s_o$       | -karakteristična izmjera otpreska                               | mm                |
| $S_{pp}$    | -udio uljevnog sustava koji se vraća u proizvodnju              | -                 |
| $S_u$       | -predvidivi udio škarta   | -                 |
| $S_{up}$    | -udio škarta za ponovnu preradbu                                | %                 |
| $T_{0ser}$  | -troškovi održavanja kalupa za seriju                           | kn                |
| $T_D$       | -dodirna temperatura  | K                 |
| $T_{iz}$    | -ukupna cijena obradbe kalupa                                   | kn                |
| $T_K$       | -temperatura stijenke kalupne šupljine                          | K                 |
| $T_{KA}$    | -ukupni trošak izradbe kalupa                                   | kn                |
| $T_{KON}$   | -ukupni trošak konstruiranja                                    | kn                |
| $T_{KS}$    | -trošak prototipne serije                                       | kn                |
| $T_{om}$    | -cijena osnovnog materijala                                     | kn                |
| $T_{os}$    | -ostali troškovi izradbe kalupa                                 | kn                |
| $T_p$       | -početna temperatura ciklusa injekcijskog prešanja              | K                 |
| $T_{PO}$    | -temperatura postojanosti oblika                                | K                 |
| $t_{po}$    | -vrijeme potrebno za postizanje temperature postojanosti oblika | s                 |
| $t_{pz}$    | -pripremno završno vrijeme                                      | h                 |
| $T_{sd}$    | -ukupna cijena standardnih elemenata kalupa                     | kn                |
| $T_T$       | -temperatura taljevine  | K                 |
| $T_V$       | -temperatura vode u šupljini proizvoda                          | K                 |
| $U_b$       | -udio boje  | -                 |
| $U_r$       | -udio regenerata  | -                 |
| $V_{pc}$    | -volumen punog crijepa  | m <sup>3</sup>    |
| $V_{pm}$    | -volumen polimernog materijala                                  | m <sup>3</sup>    |
| $V_s$       | -volumen šupljine   | m <sup>3</sup>    |
| $x_k$       | -broj kalupnih šupljina   | -                 |
| $y_i$       | -postotak šupljine koja nastaje kod proizvoda                   | -                 |
| $\Delta T$  | -razlika temperatura  | K                 |
| $\lambda$   | -koeficijent vodljivosti topline                                | W/mK              |
| $\lambda_p$ | -koeficijent vodljivosti topline za polipropilen                | W/mK              |
| $\mu_p$     | -pouzdanost postupka  | %                 |
| $\rho$      | -gustoća materije   | kg/m <sup>3</sup> |
| $\rho_p$    | -specifična gustoća   | kg/m <sup>3</sup> |

|                    |  |                   |
|--------------------|--|-------------------|
| $\rho_{\text{pm}}$ | -gustoća polimernog materijala                       | kg/m <sup>3</sup> |
| $\Phi$             | -toplinski tok                                       | kW                |
| $\Phi_{\text{c}}$  | -toplinski tok dobiven od čelika                     | kW                |
| $\Phi_{\text{p}}$  | -toplinski tok dobiven od polimera                   | kW                |
| $\Phi_{\text{uk}}$ | -ukupni izmijenjeni toplinski tok u procesu hlađenja | kW                |
| $\Phi_{\text{v}}$  | -toplinski tok dobiven od vode                       | kW                |

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

| <b>Kratika</b> | <b>Puni naziv</b>                       | <b>Značenje</b>                              |
|----------------|---|--|
| CAD            | e. Computer Aided design                | Konstruiranje s pomoću računala              |
| G F            | e. Glass Fibre                          | Stakleno vlakno                              |
| GAIM           | e. Gas Assisted Injection Moulding      | Injekcijsko prešanje s pomoću plina          |
| GIT            | nj. Gasinjektionstechnik                | Postupak injekcijskog prešanja pomoću plina  |
| IKV            | nj. Institut für kunststoffverarbeitung | Institut za preradbu umjetnih materijala     |
| PA             |   | Poliamid                                     |
| PA 6           |   | Poliamid 6                                   |
| PA 6 GF 15     |   | Poliamid 6 ojačan s 15 % staklenih vlakana   |
| PA 66          |   | Poliamid 66                                  |
| PP             |   | Polipropilen                                 |
| PP GF 20       |   | Polipropilen ojačan s 20 % staklenih vlakana |
| PP GF 30       |   | Polipropilen ojačan s 30 % staklenih vlakana |
| STL            | e. Statement List                       | Oblik datoteke za spremanje CAD dokumenata   |
| WAIM           | e. Water Assisted Injection Moulding    | Injekcijsko prešanje s pomoću vode           |
| WIT            | nj. Wasserinjektionstechnik             | Postupak injekcijskog prešanja pomoću vode   |

## 1. UVOD

U diplomskom radu objasnit će se postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode. Postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode je novi postupak, ali u industriji se vrlo često koristi. Objasnit će se različite verzije postupka, oprema, greške koje se najčešće javljaju, pokusi kojima su određivani parametri postupka i utjecaj vodenog tlaka na strukturu materijala. Posebni naglasak je dan na efekt stvaranja vodenog mjehura i na prodiranje kapljevine u proizvodu. Ove dvije pojave je najteže kontrolirati, zato je bitno poznavati mehanizme njihovog nastajanja.

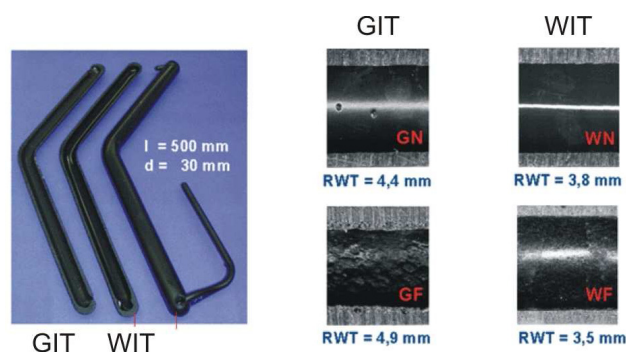
U praktičnom djelu rada razvijen je proizvod koji ima unutarnju šupljinu koja će se izraditi postupkom injekcijskog prešanja s pomoću vode. Proizvod će se podvrgnuti analizi naprezanja i deformacija u programskom paketu CATIA i prema dobivenim rezultatima napraviti će se poboljšanja proizvoda. Na kraju dat će se proračun cijena koštanja pojedinog proizvoda i shematski prikaz kalupa za injekcijsko prešanje s pomoću vode.

Cilj ovog rada je upoznavanje s postupkom injekcijskog prešanja s pomoću vode i njegova primjena na otpresku u obliku crijepa, s unutrašnjom šupljinom.

## 2. UVOD U POSTUPAK INJEKCIJSKOG PREŠANJA S POMOĆU VODE

Postupak klasičnog injekcijskog prešanja često ne može više zadovoljiti stalno rastuće zahtjeve u kompleksnosti i složenosti oblika dijelova. Posebne tehnike injekcijskog prešanja omogućuju znanstvenu izradbu visokointegriranih i kompleksnih dijelova. Ovi dijelovi se izravno dobiju u jednom sklopu bez dodatnih montaža. „Pravo rješenje“, npr. pronalazak adekvatnog postupka preradbe, stalno je problem kod inženjera. Novi postupci injekcijskog prešanja nude brojne mogućnosti.<sup>1</sup>

Postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode (e. *water injection technology* - WIT) je nova tehnologija. Prvi uspješni pokusi potječu iz godine 1998, a prvi serijski proizvedeni proizvodi iz godine 2000. Zbog lakših proizvoda, kraćih ciklusa i drugih prednosti, koje nudi taj postupak u industriji nalazi primjenu. WIT tehnologija je slična GIT (e. *Gas assisted injection technology* - GIT) postupku koji je nastao prije. Područje primjene ovih postupaka se prekriva, makar se oni bitno razlikuju. GIT se upotrebljava za izradbu šupljih dijelova i za sprečavanje promjena dimenzija proizvoda, jer tlak plina djeluje kao naknadni tlak i sprječava skupljanje djela na cijelom proizvodu. Za razliku od GIT-a WIT se upotrebljava za izradbu okruglih dijelova, koji nemaju dodatna rebra, izbočine itd osim ako nisu kratka i tanka. Bitna prednost WIT-a je u poboljšanom odvođenju topline, voda ima 4 puta veću specifičnu toplinu i 40 puta veću toplinsku provodnost u odnosu na plin. Osim toga nestlačiva je, zato je moguće postići tanje i jednolike debljine stijenka, koje prikazuje slika 2.1.<sup>2</sup>



Slika 2.1. Proizvodi dobiveni GIT i WIT postupcima<sup>2</sup>



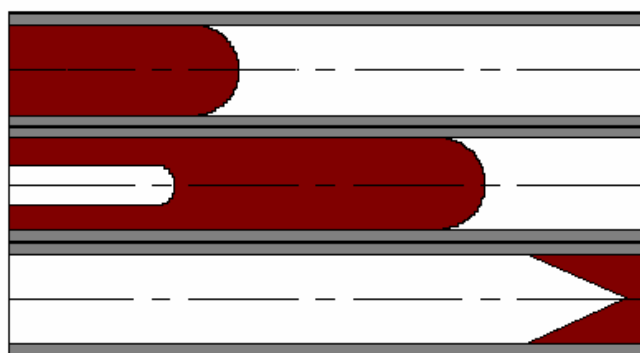
Bitna slabost WIT-a je brzo hlađenje i skrućivanje sloja materijala, koji dođe u doticaj s vodom. Posljedica brzog skrućivanja materijala je neučinkovitost djelovanja tlaka vode u funkciji dodatnog tlaka, na mjestima koja su najviše udaljena od vodenog kanala, što se najbolje vidi na debelim rebrima. Primjerenost korištenja postupka se najbolje pokazala u automobilske industriji, pri izradbi cijevi namijenjenih protoku medija (vode ili ulja). Zbog svoje učinkovitosti u odnosu na GIT i mogućnosti izradbe dijelova s velikim presjecima, postupak se u praksi dokazao, a u literaturi je moguće vidjeti sve više ostvarenih projekata.<sup>2</sup>

Kod WIT-a su ostvareni sljedeći postupci:<sup>2</sup>

- postupak s djelomičnim ubrizgavanjem vode (short-shot)
- postupak s preljevajućom šupljinom (overflow cavity)
- postupak povratnog tečenja taljevine (push back)
- postupak s protokom vode kroz unutrašnjost proizvoda (closed loop).

## 2.1. Postupak s djelomičnim ubrizgavanjem vode (short-shot)<sup>3</sup>

Poznat je i pod nazivom „bubble“ ili „blow-up“ proces, odvija se s pomoću djelomičnog popunjavanja kalupne šupljine s polimernom taljevinom. Voda se ubrizgava u kalup prije kraja ubrizgavanja polimerne taljevine, potiskujući tako materijal na stijenke kalupne šupljine prije konačnog očvršćivanja. Dotok taljevine i vode se kontrolira s pomoću ventila. Ventil za ispuštanje vode omogućuje izlazak vode iz gotovog proizvoda. Slika 2.2 shematski prikazuje ovaj postupak.



Djelomično punjenje

Ubrizgavanje kapljevine

Vodeni tlak držanja

Slika 2.2. Prikaz procesa "Short-shot" <sup>3</sup>

Prednosti postupka:

- povoljno za deblje stijenke
- nema gubitka materijala
- ulazne i izlazne točke za vodu mogu biti blizu jedna drugoj ili na istom mjestu.

Nedostaci postupka:

- potrebna je stroga regulacija procesa
- premala količina materijala dovodi do pucanja proizvoda i prodiranja vode po kalupnoj šupljini
- tlak vode mora biti veći nego onaj od polimerne taljevine da se omogući guranje materijala
- mogući su tragovi tečenja na površini proizvoda
- zadnja stijenka koja se izrađuje je deblja od drugih.

## **2.2. Postupak s prelijevajućom šupljinom (overflow cavity)<sup>3</sup>**

Kalupna šupljina se potpuno popuni s polimernom taljevinom i odvoji s pomoću ventila. Tada se otvara posebni ventil koji omogućuje vodeno ubrizgavanje, dok se istovremeno otvaraju ventili na kraju kalupne šupljine koji otvaraju sekundarne prelijevajuće šupljine. Dolazeća voda tjera materijal koji se prelijeva u pomoćnu šuplinu. Sekundarni ventil se zatvara za držanje vodenog tlaka. Voda se iz proizvoda može odstraniti s pomoću gravitacije ili isparavanja.

Prednosti postupka:

- dobra kvaliteta površine
- širi raspon parametara preradbe
- potreban je manji tlak vode.

Nedostaci postupka:

- materijal iz sekundarne kalupne šupljine treba reciklirati
- potrebno je odvojiti proizvod od suvišnog materijala.

### **2.3. Postupak povratnog tečenja taljevine (push back)<sup>3</sup>**

Polimerna taljevina potpuno popunjava kalupnu šupljinu, zatim se otvara vodeni ventil koji je smješten na kraju kalupne šupljine. Višak taljevine se potiskuje natrag u mlaznicu ubrizgavalice.

Prednosti postupka:

- ne postoji otpadni materijal.

Nedostaci postupka:

- potrebna je posebna mlaznica
- potrebno je imati odvojene sustave za dovod zraka i vode.

### **2.4. Postupak s protokom vode kroz unutrašnjost proizvoda (closed loop)<sup>3</sup>**

Kombinacijom djelomičnog popunjavanja kalupne šupljine i protoka vode kroz proizvod dobiven je ovaj postupak. Kalupna šupljina se najprije djelomično popunjava, potiskujući materijal do kraja kalupne šupljine. Tada se otvara poseban ventil, smješten na kraju kalupne šupljine kroz kojeg se voda probija nazad u visokotlačnu pumpu.

Prednosti postupka:

- ušteda materijala
- visoki učinak hlađenja.

Nedostaci postupka:

- zadebljanja na kraju vodenog puta
- nizak vodeni tlak može uzrokovati probijanje vode između unutarnje kalupne stijenke i vanjske površine proizvoda.

Postupak ubrizgavanja vode nudi mogućnost izradbe šupljih dijelova i injekcijski prešanih dijelova koji samo na određenim mjestima sadrže šupljinu. Prethodna istraživanja na IKV institutu (Institut für kunststoffverarbeitung u Aachenu) na postupku vodenog injekcijskog

prešanja bila su ograničena na nerazgranate dijelove, iako su razgranati dijelovi i dijelovi u obliku prstena vrlo bitni kod primjene ovog postupka (npr. dijelovi cjevovoda u automobilske industriji, okviri transportnih paleta itd.). Treba imati na umu da se pri izradbi ovakvih dijelova dvije odvojene protočne fronte nikada ne šire jednoliko. Umjesto jednolikog širenja, minimalne razlike u otporu prema toku u jednoj grani dovode do bržeg širenja mjehura s vodom u drugoj grani. Ovu razliku u širenju, s jedne strane, uzrokuju svojstva kalupa, a s druge strane osjetljivost samog postupka ubrizgavanja kapljevine pod visokim tlakom. Iz analize individualnih koraka u procesu ubrizgavanja, mogu se odrediti zahtjevi vezani uz kalup i kontrolu procesa koji mogu doprinijeti stabilnosti procesa.<sup>1</sup>

### 3. ULOGA KAPLJEVINE U PROCESU

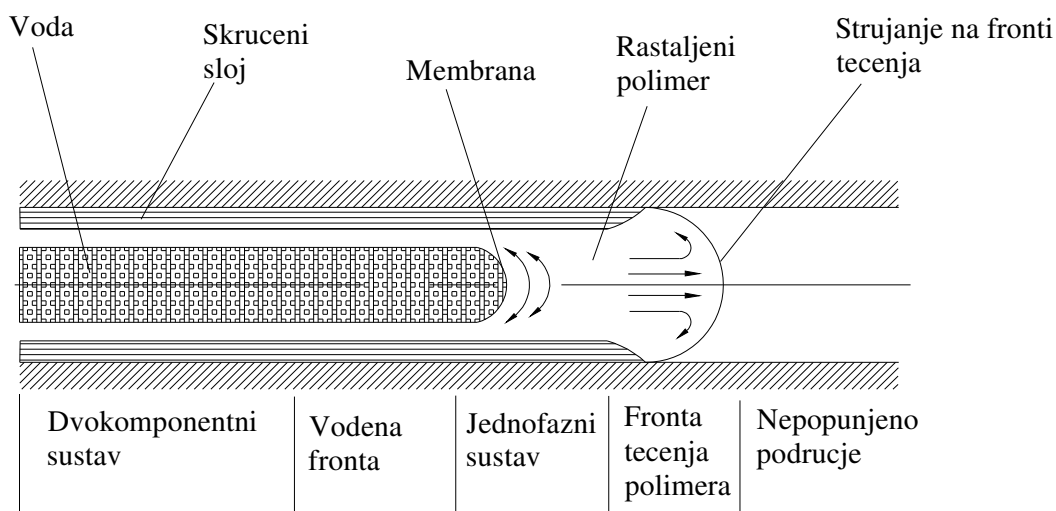
Postupak ubrizgavanja kapljevine je među najvažnijim postupcima koji se koriste pri višekomponentnom injekcijskom prešanju i pri preradbi plastomera. Pri ovom postupku se najprije polimer ubrizga u kalupnu šupljinu. Poslije ubrizgavanja se, dok je polimerna taljevina još uvijek tekuća, u taljevinu ubrizga fluid pod visokim tlakom koji još uvijek tekuću masu nastajućeg dijela razvlači na takav način da u njemu nastaje praznina. Postupak ubrizgavanja kapljevine nalazi svoju primjenu kod smanjenja vremena ciklusa, uštede u materijalu i kod smanjenja tlaka ubrizgavanja. Istovremeno omogućena je izradba dugačkih protočnih kanala, povišenje bitnih mehaničkih svojstava i ostvarenja mogućnosti izvedbe raznih oblika.<sup>1</sup>

Dodatne mogućnosti su:

- smanjenje vremena ciklusa do 70 %
- različite debljine stijenki proizvoda
- visoka koncentričnost šupljina
- visoka kvaliteta površine u šupljini.

Na stanje konačnog proizvoda, ponajprije vitoperenje i mehanička svojstva, se kod postupka vodenog injekcijskog prešanja izravno utječe kroz srašćivanje unutarnje šupljine, koje ima za posljedicu i izvrsna protočna svojstva proizvoda kod kasnije primjene.<sup>1</sup>

Tijekom primjene postupka injekcijskog prešanja s pomoću vode nastaje kompleksno strujanje dvokomponentnog sustava sastavljenog od polimera i vode gdje se može promatrati pet različitih područja prikazanih na slici 3.1.



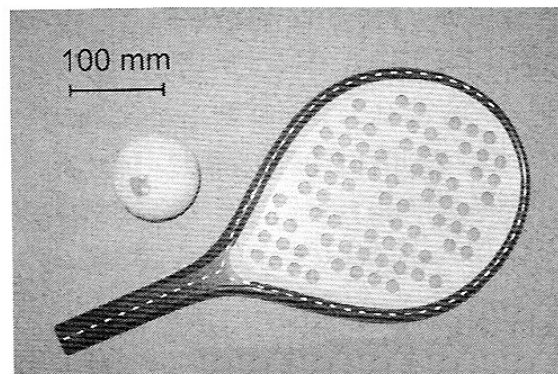
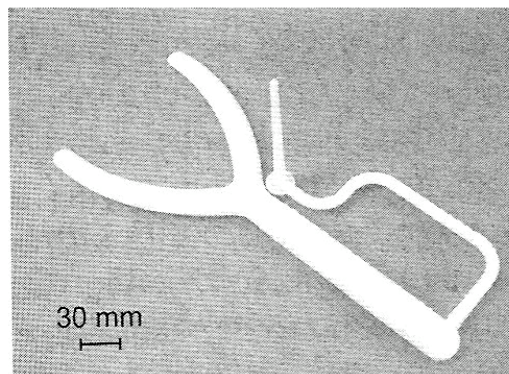
Slika 3.1. Širenje vodenog mjehura <sup>1</sup>

Kod početka ubrizgavanja kapljevine, kapljevina prodire u taljevinu plastomera i dijeli je. Pri tome tjera taljevinu od sebe prema naprijed. Jedan dio taljevine priljubljuje se na stijenku kalupne šupljine tako da svako sljedeće širenje ovog sustava, koje je gonjeno kapljevinom, širi ovaj priljubljeni dio. Kod toga istovremeno fronta ponovo uzima istu brzinu širenja, sve dok fronta ne dođe do dijela koji sprječava njezino širenje. Iz razloga dvokomponentnog strujanja dvije reološki različite tvari, dolazi do mnogih međusobnih procesa. Kod ubrizgavanja kapljevine dolazi do jakog toplinskog utjecaja kapljevine na taljevinu. Iz razloga jakog utjecaja hlađenja vode, stvara se tanka membrana na granici između vode i plastomerne taljevine, koja utječe na svojstva otpreska.<sup>1</sup>

Domena u kojoj se upotrebljava postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode su tankostjeni dijelovi koji imaju velik volumen i ravne površine. Kod injekcijskog prešanja s pomoću vode radi se o relativno novom postupku. Za odgovor na temeljna pitanja vezana uz ovaj postupak, koja se vrlo kratko primjenjuje u industriji, bilo je važno izvršiti istraživanja na mnogim područjima vezanim za proces. Dosadašnja istraživanja vezana uz postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode na IKV institutu, ograničena su na ugradbene elemente. Istodobno se radi o geometriji koja je vezana za praktičnu primjenu, s naglaskom na dijelove koji imaju odvojenu ili prstenastu geometriju. Naročito naglasak je na razgranatim dijelovima i šupljim profilima, kao na primjer okvirima transportnih sanduka i na drugim produktima kao na primjer teniskom reketu za Beachball.<sup>1</sup>

### 3.1. Problemi kod dijelova s razdvojenom ili prstenastom geometrijom <sup>1</sup>

Osnovni problem kod dijelova s razdvojenom ili prstenastom geometrijom je vezan za dva moguća smjera tečenja kapljevine i taljevine, gledano s mjesta ubrizgavanja kapljevine. Kod dijelova s razdvojenom geometrijom ne dolazi do ponovnog spajanja fronti, dok se kod dijelova s prstenastom geometrijom fronte spajaju iz razloga zajedničkog napredovanja i stvaraju zadebljanja na mjestu spajanja. Na slici 3.2 prikazani su testni primjerci proizvoda na kojima su provedena istraživanja vezana uz ovaj postupak.

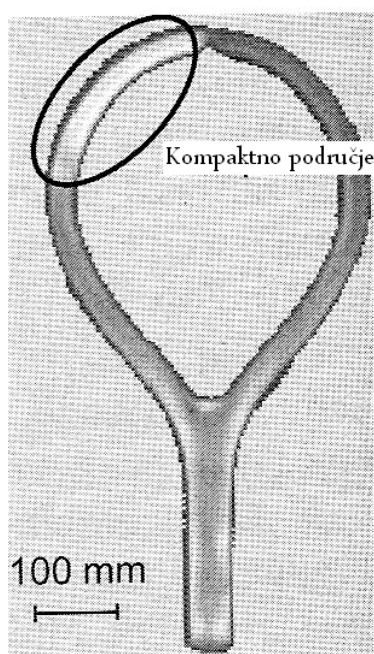


Slika 3.2. Slika proizvoda (testni primjerci na IKV institutu) <sup>1</sup>

Kada istovremeno postoje drugi alternativni pravci tečenja u dijelovima koji se izrađuju, širenje mjehura poslije početka ubrizgavanja kapljevine jedan je od najteže upravljivih fenomena pri postupku injekcijskog prešanja s pomoću vode. Nepreciznosti u kalupu ili pogrešno vođenje procesa dovode do nejednolikog širenja mjehura kapljevine, pogotovo kada postoje stupnjevi slobode u skupu kanala na proizvodu. Nejednoliko širenje mjehura kapljevine se mora izbjeći, jer o njemu ovisi geometrija dijela, napredovanje taljevine, debljine presjeka, pa čak i greške poput

proboja kapljevine na putovima tečenja. Prilikom proboja kapljevine, pri postupku injekcijskog prešanja s pomoću vode problematičan je kontakt između kalupa i vode, gdje dolazi do razvoja korozivskih produkata. Čak kada je moguće izbjeći proboj kapljevine s pomoću velike površine ubrizgavanja, nejednoliko širenje kapljevine može dovesti do nepotrebnih velikih kompaktnih lomova na putovima tečenja kod račvanja ili na mjestima spajanja struja kod prstenastih dijelova. Kroz takve nepoželjne velike kompaktne lomove najprije su nepotrebno povećana naprezanja u materijalu kalupa i kvaliteta proizvoda je snižena zbog vitoperenja i nastanka grešaka.

Kod račvanja na rascjepu dijeli se kapljevina kao polimerna taljevina u dvije fronte tečenja. Suprotno nego polimerna taljevina, kapljevina je jako osjetljiva na minimalne razlike u otporu prema tečenju i na pogonske uvjete (toplinske, geometrijske ili reološke nehomogenosti). Općenito kod postojanja više pravaca tečenja dolazi do promjene smjera tečenja. Bolje punjenje kapljevinom jednog pravca tečenja dovodi do bržeg napredovanja dvokomponentnog sustava uzrokovanog jačim tlakom. Ovo napredovanje u jednom smjeru se samo pojačava i ne izjednačuje se s prodiranjem u drugim smjerovima. Posljedica tog napredovanja je brže nastajanje proizvoda u jednom smjeru, koje ponovno smanjuje otpor tečenja u drugim kanalima, koji se isto tako popunjavaju kapljevinom i taljevinom. Primjeri ovog fenomena prikazani su na slici 3.3.



Slika 3.3. Razlike u širenju taljevine i vode u okviru reketa <sup>1</sup>



Kako su istraživanja na reketu i prački pokazala, do punjenja taljevinom, kako je prikazano na slici 3.3, dolazi simetrično. Ovo znači da su oba kanala dobro uravnotežena za ubrizgavanje taljevine. U postupku slijedi daljnje oblikovanje proizvoda s pomoću ubrizgavanja vode, koje na kraju dovodi do jako asimetričnog širenja vodenog mjehura. Voda i uz nju taljevina u desnom kanalu tečenja reketa prethode, tako da dolazi do nesimetričnog stvaranja šupljine. Kako je prikazano na prethodnoj slici 3.3, kompaktno područje ne nalazi se u jednakim omjerima lijevo i desno od teoretskog mjesta sljublivanja u najvišoj točki reketa, nego je jasno pomaknuto u desno. To znači da je prilikom faze ubrizgavanja vode došlo do nejednolikog širenja fronti tečenja.

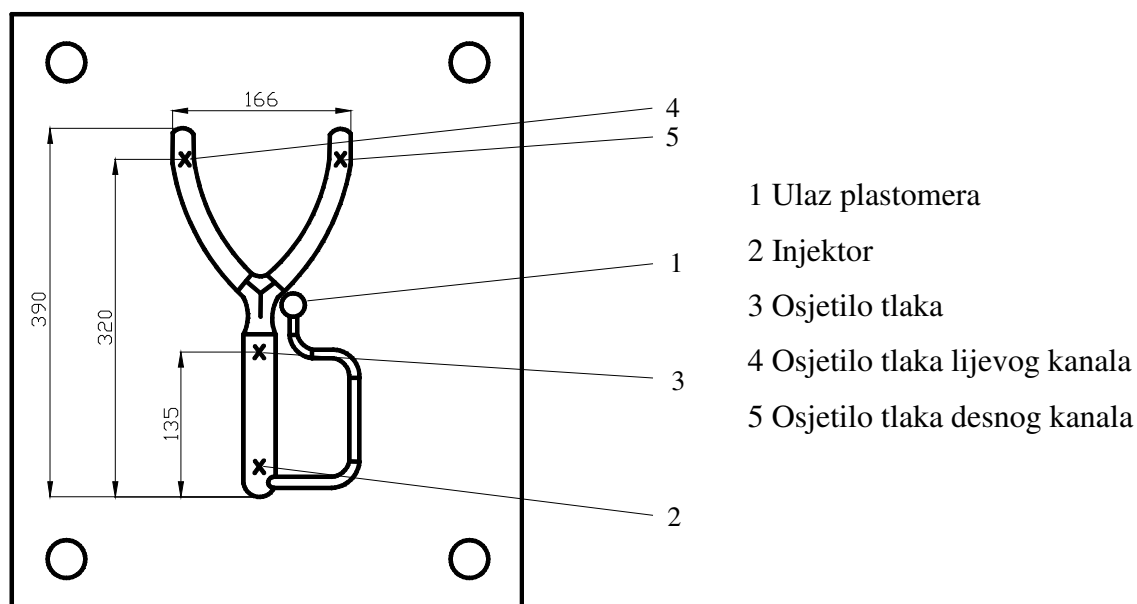
U okviru istraživanja ovog postupka na IKV institutu, na reketu namjerno su provocirana punjenja jednog kanala s razdvajajućim sredstvom u svrhu određivanja otpora tečenju kapljevine. Tijekom početka ubrizgavanja kapljevine dogodila se promjena na desnoj strani i poslije toga se ponašanje sustava promijenilo. Ovo postignuće dokazuje ekstremno visoku osjetljivost širenja kapljevine kod stvaranja šupljina na račvanjima.

Obećavajući cilj kod istraživanja i kvantificiranja utjecaja smjera toka popunjavanja, su vrijednosti parametra vođenja procesa, vrste materijala za injekcijsko prešanje i geometrije dijelova, koji utječu na stvaranje dijelova s razgranatom i prstenastom geometrijom.

### **3.2. Planiranje pokusa i njihova provedba <sup>1</sup>**

Za okvir ovog istraživanja simetričnih račvanja, određen je proizvod na kojem će se provoditi istraživanja putova tečenja kapljevine, a koji odgovara jednakim uvjetima kao kod punjenja okvira teniskog reketa. Odabrana je pračka, koja ima geometrijski uravnotežene krakove i bitno povećan otpor prema tečenju.

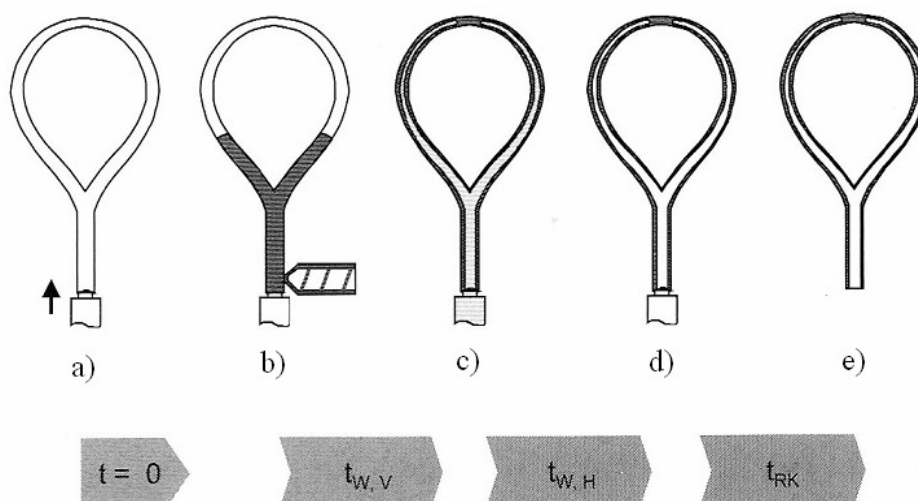
Kalup za pračku je opremljen s konvencionalnim uljevnim sustavom. U šupljini postoje tri osjetila tlaka, kako je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4. Kalupna ploča za pračku <sup>1</sup>

Teniski reket je izrađen kombinacijom postupka dvokomponentnog injekcijskog prešanja i ubrizgavanja vode. Za potrebe istraživanja, okvir je iz jednog materijala, a površina za udaranje iz drugog. Kao injektor je korišten hidraulički aksijalni injektor.

Za izradbu je korišten postupak s protokom vode kroz unutrašnjost proizvoda i postupak s djelomičnim ubrizgavanjem vode. Načelni prikaz ovog postupka prikazan je shematski na slici 3.5.



Slika 3.5. Prikaz procesa s djelomičnim ubrizgavanjem vode <sup>1</sup>

Prvo se prazna kalupna šupljina (a) napuni s polimernom taljevinom (b). Sljedeće se injektira kapljevina pod tlakom u još mekanu taljevinu proizvoda koji nastaje. U pravilu ovaj tlak nastaje s pomoću injektora koji se nalazi u kalupu. Pomoću prodiranja tlaka kroz volumen, materijal se rasprostranjuje po kalupnoj šupljini i tako nastaje proizvod (c). Tlak kapljevine se drži toliko dugo dok proizvod ne postaje dimenzijski stabilan. Na kraju ciklusa se voda ispušta iz šupljine proizvoda (d), poslije čega se dio još formira tijekom kratkog vremena hlađenja (e).

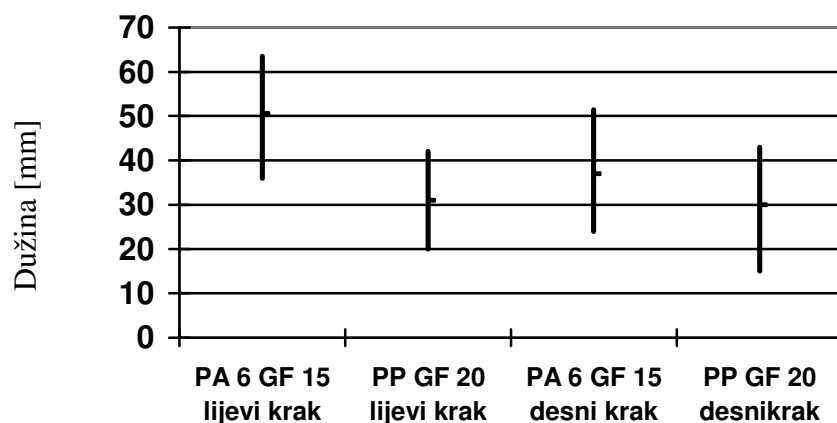
Prilikom istraživanja WIT postupka koristile su se mnoge vrste amorfnih i kristalastih plastomera. U nastavku opisana postignuća odnose se na PP ojačan s 20 % staklenih vlakana i PA 6 ojačan s 15 % staklenih vlakana. U primjeru pračke i teniskog reketa analizirani su nelinearni efekti, visina tlaka kapljevine  $p_w$  i vrijeme držanja tlaka kapljevine  $t_H$ . Tablica 3.1 prikazuje pregled spomenutog istraživanja.

Tablica 3.1. Vrste postupaka kod proizvodnje reketa i pračke <sup>1</sup>

|  | <b>Pračka</b>  | <b>Teniski reket</b>   |
|--|--|--|
| <b>Postupak</b>                                      | WIT  | WIT kombiniran s dvokomponentnim injekcijskim prešanjem  |
| <b>Materijali s kojima se provodilo istraživanje</b> | -PP GF 20<br>-PP 6 GF 15   | -PP GF 20<br>-PP   |
| <b>Varirajući parametri procesa</b>                  | -vrijeme djelovanja tlaka $t_v$<br>-visina tlaka $p_w$<br>-vrijeme djelovanja tlaka kapljevine $t_H$ | -vrijeme djelovanja tlaka $t_v$<br>-visina tlaka $p_w$<br>-vrijeme djelovanja tlaka kapljevine $t_H$ |

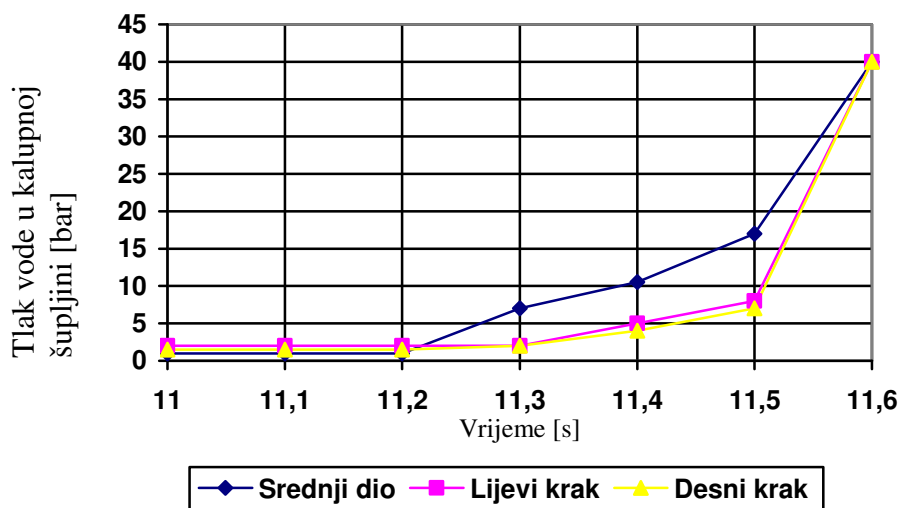
### 3.3. Stvaranje šupljine pomoću vodenog tlaka <sup>1</sup>

Kod pračke su istraživana kompaktna područja na krajevima putova tečenja. Kompaktna područja na krajevima služe za sprječavanje napuklina kada se dostigne željeni oblik. Dužine ovih kompaktnih područja pokazuju mjeru varijabilnosti procesa. Kod izvođenja ovih pokusa pazilo se na parametre, na način da niti na jednom presjeku ne dođe do proboja kapljevine.



Slika 3.6. Ovisnost dužine kraka o materijalu <sup>1</sup>

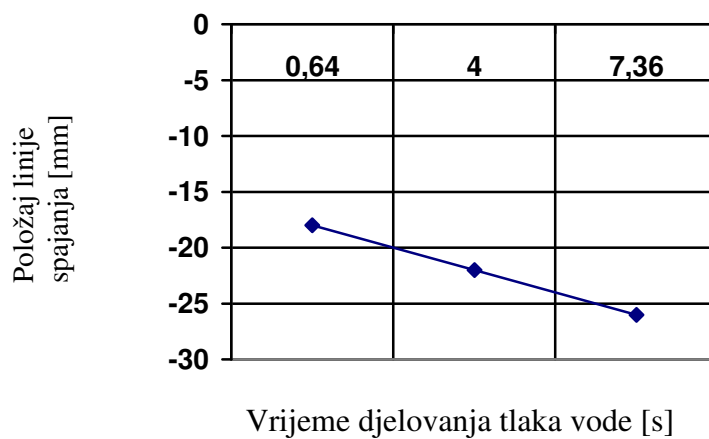
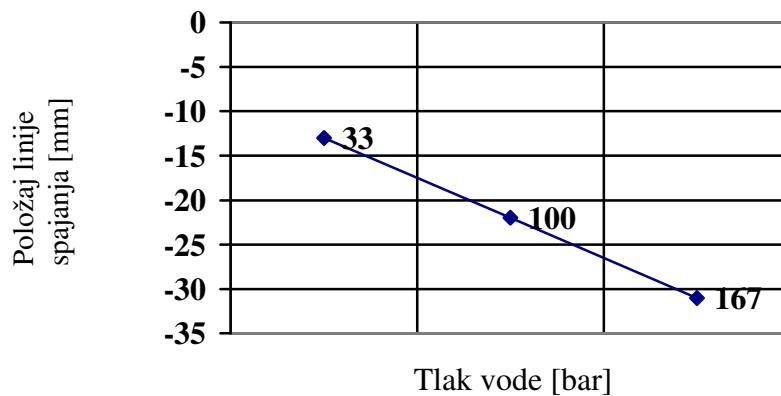
Slika 3.6 prikazuje prosječne vrijednosti dužina kompaktnih područja na krajevima puta tečenja. U prosjeku su dobivene vrijednosti dužina kompaktnih područja u desnom kraku niže. To znači da u desnom kraku postoji smanjeni otpor prema gibanju kapljevine i time nastaje manje kompaktno područje. Ova opažanja su korištena na dijagramu na slici 3.7 koji prikazuje ovisnost tlaka vode u kalupnoj šupljini (u lijevom i desnom kraku i u središnjem dijelu) u ovisnosti o vremenu.



Slika 3.7. Prosječne vrijednosti tlaka vode u kalupnoj šupljini za vrijeme oblikovanja proizvoda <sup>1</sup>

Prilikom izvođenja ovih pokusa pazilo se na temperaturne uvjete prostora (nisu odstupali više od 0,5 °C). Posljedica ovih razlika u punjenju simetričnih kanala u alatu, ukazuje na visoku osjetljivost procesa širenja tijekom ubrizgavanja vode.

U idealnom slučaju simetrično širenje kapljevine kod teniskog reketa očituje se spajanjem dvije fronte točno u sredini okvira. Kompaktna područja na krajevima oba kraka širenja spajaju se, na mjestu gdje se ove fronte sudaraju. To područje se, na svim proizvodima koji su proizvedeni za potrebe pokusa, mjeri s pomoću mjerne trake. Ako spojna linija leži lijevo od sredine, vrijednost se uzima kao negativna, ako leži na desno, vrijednost se uzima pozitivnom. Iz mjernih rezultata dobivenih pokusom, dobiveni su koeficijenti kvadratnog modela, koji opisuje zavisnost ulaznih veličina (vrijeme djelovanja vodenog tlaka, tlak vode i vrijeme držanja vodenog tlaka) i željenih veličina (dužina spojnog područja). Na vrijednosti pokusnih rezultata primijenjena je metoda centralne regresije, a dobiveni rezultati prikazani su na dijagramu na slici 3.8. Dobivene vrijednosti u dijagramu su dobivene s pouzdanošću od 95 % .

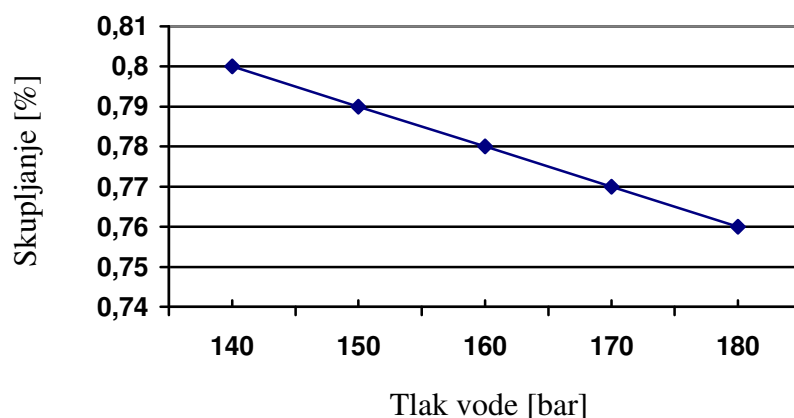


Slika 3.8. Položaj linije spajanja (PP GF 20) <sup>1</sup>

Dužina spojnog područja jasno pokazuje ovisnost odabranog tlaka kapljevine i vremena držanja tlaka. Negativne vrijednosti na ordinati označuju da je mjesto spajanja na lijevoj strani. Sa smanjenjem tlaka vode nesimetrično širenje kapljevine se smanjuje.

### 3.4. Utjecaj vodenog tlaka na skupljanje proizvoda <sup>1</sup>

Definicija skupljanja se odnosi na kontrakciju volumena proizvoda tijekom faze hlađenja od stanja taljevine do čvrstog stanja. Kod prije opisanih proizvoda (pračke i reketa) analizirani su utjecaji tlaka na skupljanje. Analiza varijance rezultata mjerenja pokazuje ovisnost tlaka vode kod vremena držanja tlaka kapljevine na dimenzijsku stabilnost proizvoda (smanjenje skupljanja) s pouzdanošću od 95 %. Dijagram na slici 3.9 prikazuje učinak tlaka kapljevine.

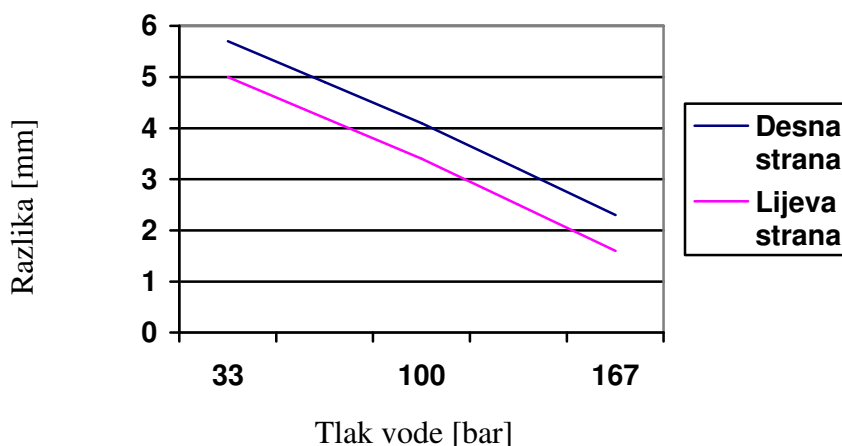


Slika 3.9. Utjecaj tlaka na skupljanje kod pračke (PA 6 GF 15) <sup>1</sup>

### 3.5. Vitoperenje <sup>1</sup>

Vitoperenje je posljedica razlika u smjerovima tečenja, koje dovode još i do razlika u debljinama presjeka proizvoda. Posebno kod ravnih dijelova, vitoperenje je jedan od najvažnijih pokazatelja kvalitete proizvoda.

Visinomjerom su mjerene udaljenosti od referentne ravnine do četiri karakteristične točke na reketu. Uzete su u obzir i dimenzijske greške kalupa. Dobiveni rezultati za svaku točku reketa govore o pravoj vrijednosti progiba. Za obradu rezultata mjerenja koristila se metoda regresije i dobiven je model za ojačani PP s pouzdanošću od 95 %. Dijagram na slici 3.10 prikazuje dobivene rezultate.



Slika 3.10. Ovisnost vitoperenja i vodenog tlaka <sup>1</sup>

U dijagramu je prikazana ovisnost vodenog tlaka i iznosa vitoperenja. Jasno je vidljivo da se s povećanjem tlaka smanjuje i vitoperenje. Razlike između vrijednosti za lijevu i desnu stranu su posljedica dužine kompaktnog područja i iz toga nastalih razlika u vitoperenju.

### 3.6. Proces ubrizgavanja vode <sup>2</sup>

Postupak ubrizgavanja vode unosi u proces dodatne parametre (tlak vode, kašnjenje tlaka vode, količinu ubrizgane vode, pomak puža, količinu taljevine). Kod WIT-a su posebno bitna dva parametra: temperatura vode i volumenski protok ubrizgane vode. Oba parametra bitno utječu na brzinu ohlađivanja i time na oblikovanje vodenog kanala. U literaturi je moguće vidjeti da za proces ubrizgavanja s vodom, najveći utjecaj ima volumenski protok vode, koji mora biti dovoljno velik. Dovoljno velik protok vode dovoljno brzo odmiče nastalu središnju kalotu i sprječava skrućivanje preostalog materijala. To je posebno važno kod preradbe kristalastih materijala (npr. PA 66), koji brzo kristaliziraju. Kod ubrizgavanja vode, tlak vode mora biti što niži, a protok vode što veći. Na kraju ubrizgavanja vode, tlak vode mora rasti da kompenzira skupljanje materijala i da spriječi nastanak šupljina.



### 3.7. Naprave i injektori za ubrizgavanje vode <sup>2</sup>

Naprave i injektori za ubrizgavanje vode su jedan od najvažnijih elemenata u postupku ubrizgavanja vode. Kod svih postupaka je važno, da se voda brzo ubrizga, zato moraju naprave i injektori omogućiti dovoljno velike protoke sa čim manjim gubitcima. Brzo ubrizgavanje vode je problem iz dva razloga. Prvi je otpor isparivanju vode na dodiru između vode i taljevine, drugi je prebrzo skrućivanje taljevine koje onemogućava daljnje napredovanje vode. Ako dođe do isparivanja vode, proces postaje sličan GIT-u i para prouzrokuje hidrolizu materijala. Za dostizanje dovoljno velikog protoka kroz injektor on mora biti dovoljno velik. Minimalni promjeri, spomenuti u literaturi su 8 mm. Naprave za ubrizgavanje vode dostižu tlakove do 400 bar, a protoci se kreću između 15-50 l/min. Odabir pogonske naprave zavisi o veličini proizvoda. Injektori se od proizvođača do proizvođača razlikuju po obliku, načinu djelovanja i po funkcijama koje nude. Primjer injektora pokazan je na slici 3.11.

Svi injektori moraju zadovoljiti dvije osnovne funkcije:

- moraju biti zatvoreni dok se u kalupnu šupljinu ubrizgava taljevina
- kod završetka ubrizgavanja moraju biti otvoreni i dati dovoljni protok.

Uz osnovne funkcije neki injektori omogućuju i sljedeće:

- ubrizgavanje plinskog mjehurića prije ubrizgavanja vode (za osjetljive materijale)
- na kraju ciklusa upuhivanje zraka za odstranjivanje vode
- nadzor položaja igle za zatvaranje.



Slika 3.11. Injektori za ubrizgavanje vode <sup>2</sup>

Injektori su isto tako važan element kod uklanjanja vode iz proizvoda, jer sva voda istječe preko njih. Dodatne funkcije koje injektor nudi, dodatno pomažu kod uklanjanja vode.

Voda se iz proizvoda uklanja na slijedeće načine:

- s pomoću pare, koja nastaje iz vode pri završetku djelovanja tlaka
- s pomoću gravitacije, ako je izradak u kalupu pravilno orijentiran
- s pomoću zraka kojeg se upuhuje na suprotnoj strani od mjesta ubrizgavanja vode
- s pomoću periodičkog upuhivanja zraka kroz injektor
- s pomoću dovoljno velike količine zraka, koji se upuhuje pred ubrizgavanjem vode
- s pomoću reaktanata koji u dodiru s vodom stvaraju plin.

Ako je moguće, potrebno je izradak u alatu orijentirati tako, da je injektor postavljen na najnižoj točki kalupne šupljine. Na taj način osigurano je uklanjanje vode s pomoću gravitacije. Kod materijala s visokim talištem (PA) je para koja nastaje kod prestanka djelovanja tlaka dovoljna za uklanjanje vode iz alata.

### 3.8. Optimiranje prodiranja vode <sup>4</sup>

U konvencionalnom postupku injekcijskog prešanja, polimerna taljevina se počinje hladiti čim uđe u kalupnu šupljinu. Materijal je tada izvrnut procesu skupljanja i dobiva tvrdi sloj na površini. U injekcijskom prešanju s pomoću vode, voda prodire u jezgru proizvoda i gura materijal na stijenku kalupa i time smanjuje efekt skupljanja. Što duže voda penetrira u proizvod, to tlak vode duže gura materijal. Optimiranjem dužine ciklusa penetriranja, mogu se smanjiti utjecaji skupljanja.

Optimiranje proizvoda ili procesa znači određivanje najboljih vrijednosti parametara koji utječu na proizvodnju. Taguchijeva ortogonalna mreža je jedan od najboljih načina za nalaženje optimalnih postavki za proces i izbjegavanje kaosa koji nastaje pri mjerenju i na koji se ne može utjecati.

Za optimiranje vodene penetracije, dužine vodene penetracije koje su dobivene pokusnom proizvodnjom analiziraju se statistički. U Taguchijevoj analizi, signal-šum omjer je statistički parametar koji predstavlja snagu odziva signala podijeljenim sa snagom varijance signala s obzirom na šum. Ovdje su faktori signala faktori koji određuju vrijednosti odziva karakteristika proizvoda. Faktori šuma su faktori koje je teško ili skupo za ukloniti iz rezultata mjerenja. Omjer signal-šum (3.1) dobiva se iz gubitka funkcije i poprima različite oblike ovisno o ciljevima optimiranja. Povećanje omjera signal-šum dovodi do smanjenja bilo kojeg svojstva koje je osjetljivo na šum. Za povećanje učinkovitosti vodene penetracije korišten je Taguchijev princip: „što više-to bolje“.

Jednadžba koja opisuje to načelo je: <sup>4</sup>

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (3.1)$$

Gdje su  $y_i$  postotak šupljine koja nastaje kod proizvoda, a  $n$  odgovara broju mjerenja u svakom pokusu.

Za dobivanje pouzdanih podataka, koristila se kombinacija parametra, koji su podijeljeni u tri razine kako prikazuje tablica 3.2.

Tablica 3.2. Vrijednosti parametara po razinama <sup>4</sup>

| Razine parametara  | 1. razina | 2. razina | 3. razina |
|--|-----------|-----------|-----------|
| A-temperatura taljevine<br>[°C]                              | 220       | 230       | 240       |
| B-temperatura stijenke<br>kalupne šupljine [°C]              | 45        | 60        | 75        |
| C-postotak popunjenosti<br>kalupne šupljine<br>polimerom [%] | 61        | 66        | 71        |
| D-tlak vode [MPa]  | 6         | 7,5       | 9         |
| E-temperatura vode [°C]                                      | 45        | 55        | 65        |
| F-vrijeme čekanja [s]  | 0         | 1,5       | 3         |
| G-vrijeme djelovanja<br>naknadnog tlaka [s]                  | 20        | 30        | 40        |

Nakon definiranja ovih razina napravljen je plan pokusa koji ima 18 mjerenja. Plan pokusa prikazan je u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Plan pokusa <sup>4</sup>

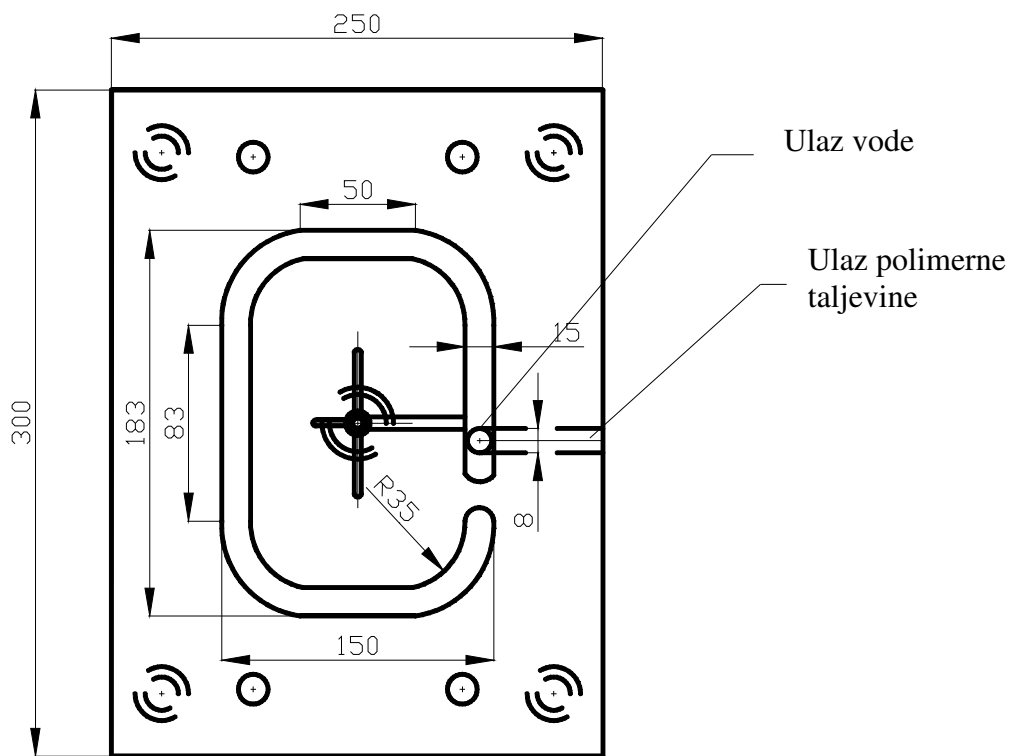
| Stanje<br>pokusa | A | B | C | D | E | F | G |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 1                | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2                | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3                | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4                | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5                | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6                | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7                | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 8                | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 9                | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 10               | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 11               | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12               | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 13               | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 14               | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 15               | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 16               | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 17               | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 18               | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 |

Tablica 3.4. Rezultati prodiranja vode na polipropilenu s 20 % staklenih vlakana <sup>4</sup>

| Redni broj pokusa | Dužine vodenog prodiranja |         |         |         |         |                       |
|-------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
|                   | 10 [cm]                   | 20 [cm] | 30 [cm] | 40 [cm] | 50 [cm] | Signal/šum omjer [dB] |
| 1                 | 43,028                    | 42,828  | 42,528  | 42,628  | 42,778  | 32,62014              |
| 2                 | 42,028                    | 42,128  | 42,328  | 41,928  | 42,078  | 32,4851               |
| 3                 | 38,078                    | 37,928  | 38,328  | 38,028  | 38,228  | 31,62242              |
| 4                 | 46,0214                   | 45,873  | 46,0214 | 45,9376 | 45,7638 | 33,24063              |
| 5                 | 39,928                    | 39,828  | 40,028  | 40,128  | 39,978  | 32,03634              |
| 6                 | 35,2886                   | 35,8448 | 36,1229 | 35,2886 | 35,2886 | 31,01961              |
| 7                 | 40,328                    | 40,428  | 40,528  | 40,278  | 40,478  | 32,12928              |
| 8                 | 38,028                    | 37,168  | 37,428  | 37,628  | 37,928  | 31,51115              |
| 9                 | 44,0733                   | 44,0733 | 44,3674 | 44,5528 | 44,1236 | 32,91568              |
| 10                | 38,078                    | 38,328  | 38,178  | 37,928  | 37,978  | 31,61786              |
| 11                | 45,0382                   | 44,3674 | 45,4798 | 44,9236 | 44,7382 | 33,04589              |
| 12                | 42,028                    | 41,978  | 42,128  | 41,828  | 42,128  | 32,46862              |
| 13                | 41,528                    | 41,328  | 40,828  | 41,228  | 41,428  | 32,31182              |
| 14                | 36,5864                   | 37,628  | 37,0499 | 37,428  | 37,728  | 31,4288               |
| 15                | 44,5632                   | 44,5528 | 44,3674 | 44,7382 | 44,673  | 32,98249              |
| 16                | 35,1016                   | 36,404  | 35,8448 | 36,6791 | 35,2886 | 31,0893               |
| 17                | 43,628                    | 44,0733 | 43,928  | 43,9966 | 43,528  | 32,83527              |
| 18                | 43,628                    | 43,778  | 43,778  | 43,578  | 43,828  | 32,81314              |

Tlocrt alata na kojem se radila probna proizvodnja prikazan je na slici 3.12, presjek proizvoda je krug promjera 15 mm. Pokus se provodio na način da se u polimer u kalupu ubrizgavala voda, poslije toga se mjerilo koliko posto je volumen nastale šupljine u odnosu na ukupni volumen punog dijela. Rezultati pokazuju da kod polipropilena s 20 % staklenih vlakana dolazi do nepravilnosti i nekontinuiranog prodiranja vode u jezgru, dok je kod čistog plastomera

jednakomjerna, što prikazuje tablica 3.4. Uzrok je najvjerojatnije prebrzo skrućivanje taljevine i viša viskoznost materijala. Vlakna prouzrokuju manju kvalitetu površine vodenog kanala.



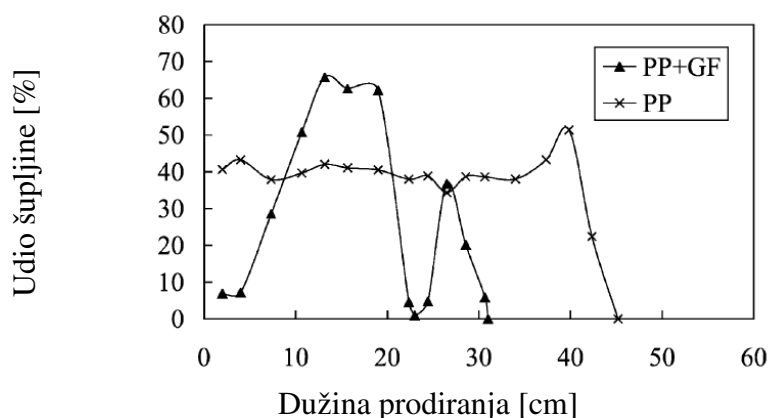
Slika 3.12. Tlocrt pokusnog kalupa <sup>4</sup>

Iz prije navedenog pokusa dobiveni su optimalni parametri za injekcijsko prešanje s pomoću vode s polipropilenom s 20 % staklenih vlakana. Optimirani parametri predstavljaju temperaturu polimerne taljevine od 220 °C, temperaturu stijenke kalupne šupljine od 75 °C, 61 % popunjenosti kalupne šupljine, 7,5 MPa vodeni tlak, 3 s vrijeme odgode vodenog tlaka i 40 s djelovanja naknadnog tlaka vode.

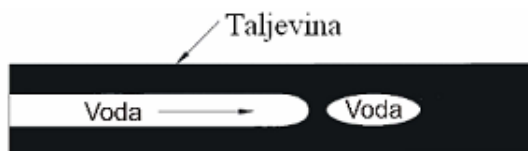
Omjer signal-šum je izračunat iz vrijednosti dobivenih pokusom i iznosi 33,57 dB. On je mnogo veći nego onaj stvarni dobiven pokusom. Stoga se mogu prije navedeni parametri povećavati za dobivanje optimalnih vrijednosti u proizvodnji.

### 3.9. Ponašanje vodene penetracije u proizvodima <sup>4</sup>

Dijagram na slici 3.13 prikazuje mjereni omjer šupljine u odnosu na puni materijal na različitim presjecima proizvoda za neojačani polipropilen i polipropilen s 20 % staklenih vlakana. Kompozitni materijal kao što je polipropilen s 20 % staklenih vlakana pokazuje bitno drugačija svojstva. Iz dijagrama je vidljivo da dolazi do zatvaranja kanala na 23 centimetru. Ovo zatvaranje prikazano je shematski na slici 3.14.



Slika 3.13. Udio šupljine na presjecima <sup>4</sup>



Slika 3.14. Zatvaranje kanala <sup>4</sup>

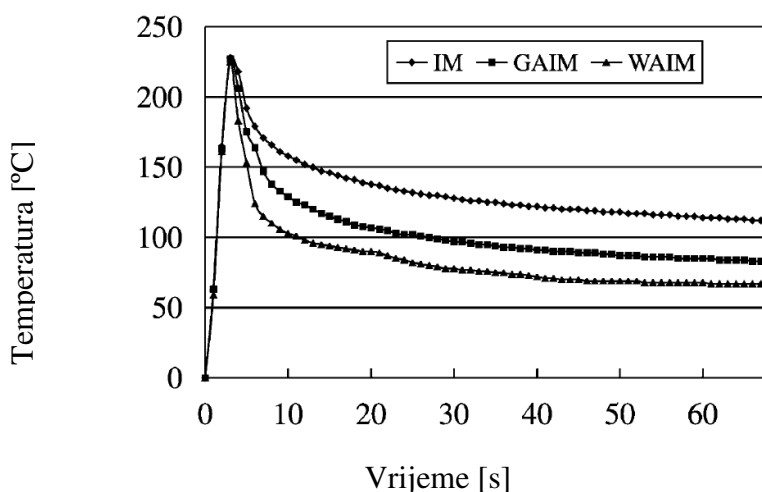
Čim se voda ubrizga u proizvod, ona počinje hladiti kompozitni materijal i time značajno povisuje viskoznost taljevine. Vodi tada postaje teže za penetrirati kroz jezgru proizvoda. Uz to, zbog postojanja vlakana u materijalu, raspodjela temperature nije jednaka tijekom procesa hlađenja. Budući da viskoznost polimera najviše ovisi o temperaturi polimera, nejednolika raspodjela temperatura može dovesti do razlika u otporu tečenju. Nepravilna i prekinuta tečenja događaju se u jezgri proizvoda. Ovo može objasniti zašto polipropilen s staklenim vlaknima ima nejednolike unutarnje površine.



### 3.10. Temperaturni profil proizvoda <sup>4</sup>

Mjerena je temperatura u kalupnoj šupljini, koristili su se termoparovi promjera 0,5 mm. Osjetljivi dijelovi osjetila smješteni su u kalupnu šupljinu na dubinu od 5 mm od stijenke kalupne šupljine. Za točno mjerenje se koristila akvizicijska kartica i računalo.

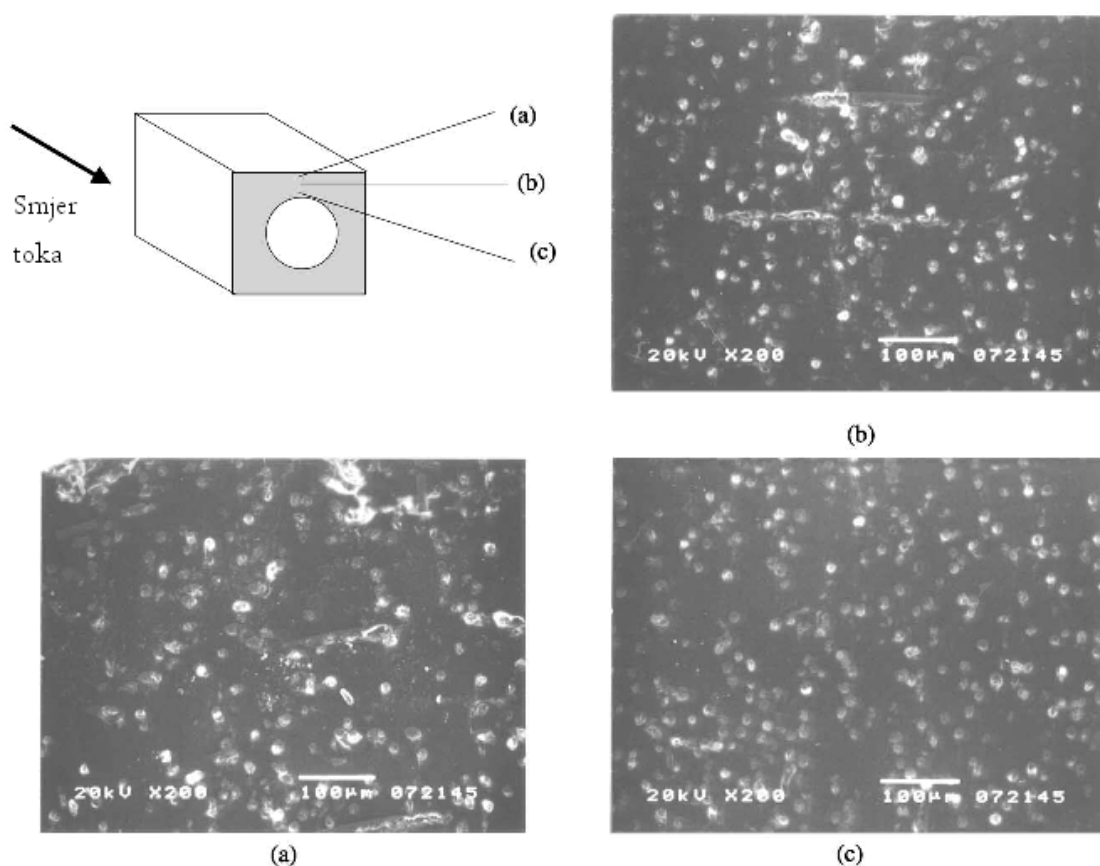
Temperaturne varijacije injekcijskog prešanja s pomoću vode su uspoređivane s konvencionalnim injekcijskim prešanjem i s plinskim injekcijskim prešanjem. Dobiveni rezultati prikazani su u dijagramu na slici 3.15.



Slika 3.15. Temperaturni profili kod različitih tehnika prešanja <sup>4</sup>

### 3.11. Orijentacija vlakana u proizvodima <sup>4</sup>

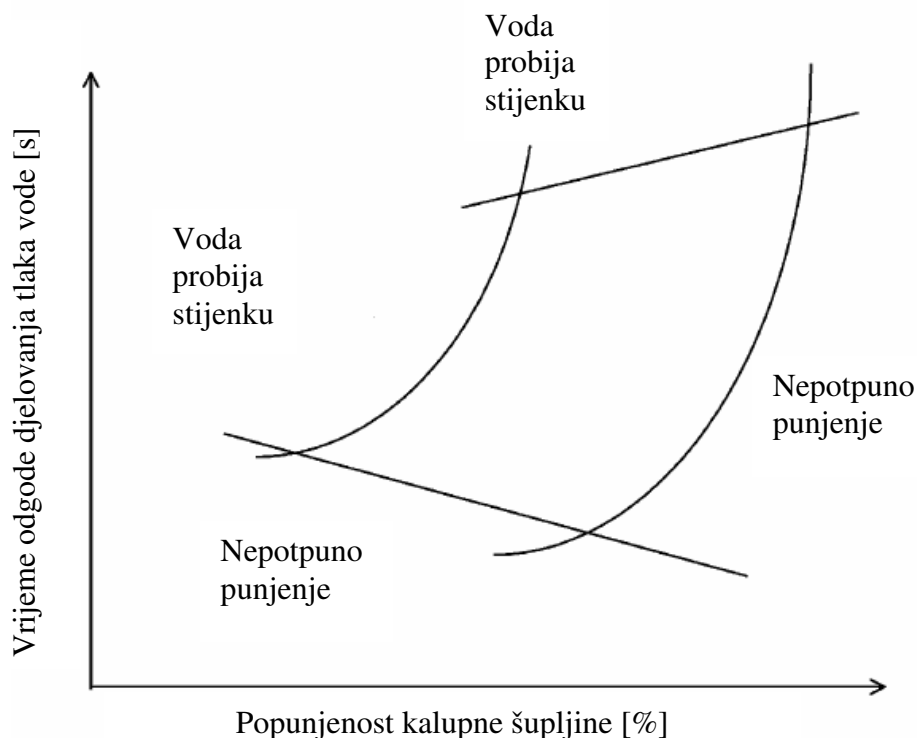
Orijentacija vlakana se promatrala pod elektronskim mikroskopom. Slika 3.16 pokazuje fotografije kompozitnog materijala u različitim zonama: na dodiru polimera i kalupa, u centru polimera i na dodiru polimera i vode. U graničnim područjima (na dodiru polimera i kalupa i na dodiru polimera i vode), vlakna su paralelna. U središnjoj zoni trenje je manje, a vektor brzine veći. U ovom slučaju, vlakna se isto tako orijentiraju u smjeru tečenja materijala, ali ne tako pravilno kao u rubnim područjima. Općenito, vlakana u svim područjima se orijentiraju u smjeru toka. Rezultati su drugačiji od onih dobivenih konvencionalnim injekcijskom prešanjem, gdje su vlakna orijentirana paralelno u rubnim područjima, a u jezgri okomito na smjer tečenja.



Slika 3.16. Orijentacija vlakana: a) rubno područje kalup-polimer b) jezgra proizvoda c) rubno područje voda- polimer <sup>4</sup>

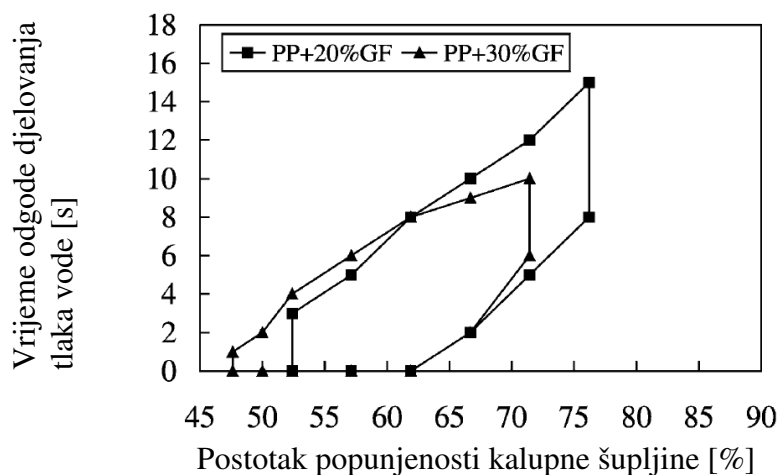
### 3.12. Dobivanje dijagrama injekcijskog prešanja s pomoću vode<sup>4</sup>

Da bi se dobili zadovoljavajući vodeno prešani dijelovi, materijal, kalup i procesni parametri određuju izvedljivost proizvoda. Izvedljivost kod injekcijskog prešanja s pomoću vode se može definirati s pomoću površine kalupa i ključnih parametara, količine popunjenosti šupljine i vremena odgode djelovanja tlaka vode, kako je prikazano dijagramom na slici 3.17.



Slika 3.17. Dijagram injekcijskog prešanja s pomoću vode <sup>4</sup>

Područje dobrih proizvoda je omeđeno s četiri linije. Izvan ovog područja dijelovi mogu sadržavati greške. Iznad i lijevo od krivulje, voda umjesto da gura polimer prema naprijed, može ga probiti. Ispod krivulje i desno od krivulje, kalup se ne može potpuno popuniti. Samo ako se nalazi u području omeđenom s ove četiri krivulje, proizvod se može pravilno popuniti. Ovi dijagrami se mogu koristiti za procjenu nove opreme i konstrukcije proizvoda. Za usporedbu učinkovitosti dobivanja proizvoda i konstrukcije kalupa, dijagram injekcijskog prešanja s pomoću vode se može napraviti za svaki sustav. Sustav s većim područjem popunjenosti kalupne šupljine je pogodniji jer se proces injekcijskog prešanja s pomoću vode može uspješno izvesti u širokom spektru parametara o kojima zavisi. Prema ovom konceptu dobiveni su dijagrami kompozitnih materijala (PP s 20 % i 30 % staklenih vlakana), prikazani na slici 3.18.

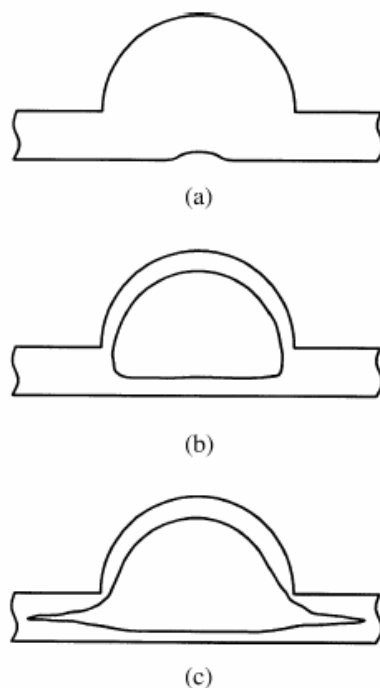


Slika 3.18. Dijagram injekcijskog prešanja s pomoću vode za ojačani polipropilen <sup>4</sup>

Područje optimalnih parametara se smanjuje s povećanjem udjela staklenih vlakana u materijalu. Karakterizacija izvedljivosti koja je definirana kao površina u procesnim parametrima može služiti kao vodilja za optimiranje injekcijskog prešanja s pomoću vode.

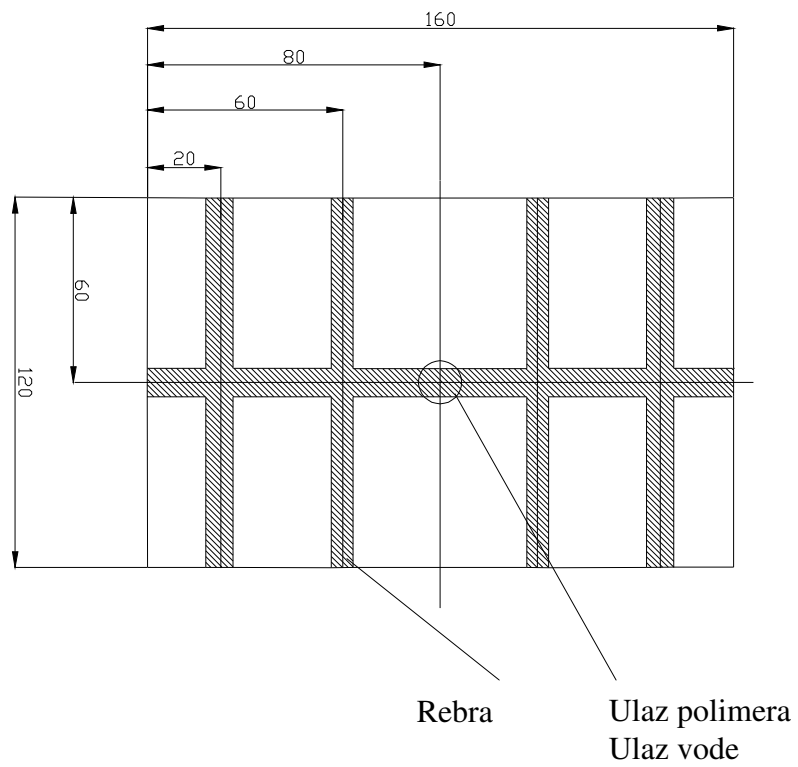
### 3.13. Ponašanje vode i materijala kod injekcijskog prešanja s pomoću vode<sup>5</sup>

Postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode ima mogućnost proizvodnje proizvoda koji imaju debele i tanke stijenke i dobru krutost. Za povećanje krutosti dijelova često se pri konstruiranju dodaju rebra. Rebra isto tako služe kao vodeni kanali koji vode vodu tijekom procesa injekcijskog prešanja s pomoću vode. Ipak vodeni mjehuri mogu penetrirati izvan rebara i oblikovati neželjene šupljine i oblike prikazane na slici 3.19.

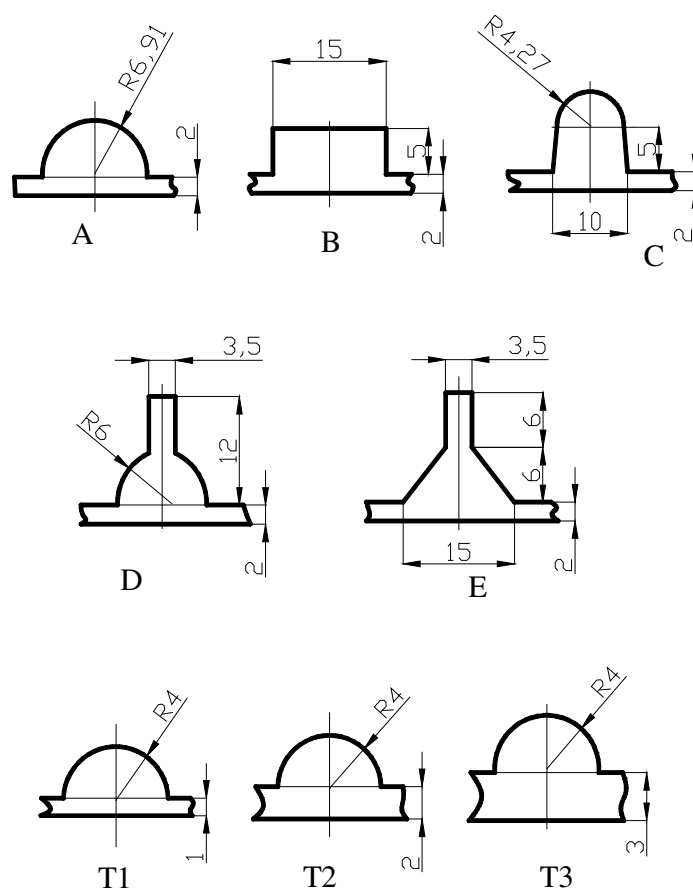


Slika 3.19. Prikaz modela s rebrom: a) konvencionalno injekcijsko prešanje, b) injekcijsko prešanje s pomoću vode, c) stvaranje neželjenih šupljina<sup>5</sup>

Stvaranje neželjenih šupljina može imati nepovoljne utjecaje na čvrstoću proizvoda i postoji potreba za shvaćanjem načina na koji nastaju. Pokusi na ovom području su se provodili na ubrizgavalici sile držanja kalupa 800 kN opremljenoj laboratorijskom visokotlačnom pumpom. Tankostjena ploča s rebrima za pojačanje (vodenim kanalima) se koristila u svim pokusima. Dodatno su se analizirali utjecaji geometrije rebara. Slika 3.20 prikazuje izgled pokusne pločice i njezine dimenzije.



Slika 3.20. Prikaz pločice na kojoj su provedeni pokusi <sup>5</sup>



Slika 3.21. Oblici presjeka rebara<sup>5</sup>

Proizvod je pravokutna ploča na kojoj je postavljeno pet vrsta rebara prikazanih na slici 3.21. Punjenjem vodenih kanala dio može poprimiti željenu geometriju i imati debljinu stijenke od 1, 2 i 3 mm. Izgled kalupa i kalupne šupljine pokazuje slika 3.20. Ventil za ulaz vode je smješten u središtu dijela ispod izbacivala. Temperaturu vode koja cirkulira kontrolirala je jedinica za temperiranje kalupa.

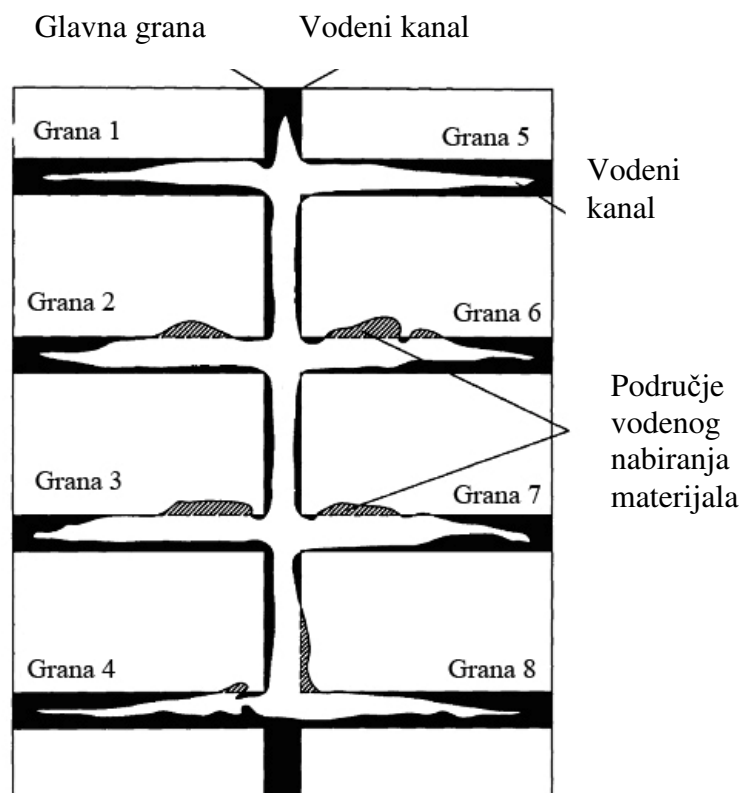
Testirani su različiti parametri preradbe u smislu njihovih utjecaja na proces injekcijskog prešanja s pomoću vode i geometriju kanala u rebrima: temperatura polimerne taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine, temperatura i tlak vode, vrijeme odgode djelovanja vodenog tlaka i količina ubrizgane polimerne taljevine. Podatke o pojedinim pokusima pokazuje tablica 3.5.

Karakterizacija dobivenih dijelova je rađena poslije ubrizgavanja. Poslije ubrizgavanja dobiveni dijelovi su ručno označavani ovisno o dubini penetriranja vodenog mjehura i smješteni u kutiju. Slike dijelova iz kutije su zatim skenirane u računalo i program za analizu slike je provodio karakterizaciju dužine projiciranog područja gdje se nalazio vodeni mjehur. Za kvalificiranje geometrijske veličine i oblika vodenog mjehura kao i veličine vodenog kanala definirani su sljedeći parametri:

- volumen vode
- dužina i projicirano područje vodenog mjehura.

Pretpostavljajući da je gustoća vode 1, volumen vodene penetracije u djelu je tada izračunata iz težina dijelova prije i poslije uklanjanja vode.

Dužine vodene penetracije u glavnoj grani i u osam sporednih grana vodenog mjehura su označene kao  $L_0$  i  $L_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ ), kako je prikazano na slici 3.22.



Slika 3.22. Redoslijed grana i područja vodenog nabiranja <sup>5</sup>



Površina projiciranog područja vodenog mjehura i ukupna površina stvarnog vodenog mjehura izvan vodenog kanala su usklađene prema vrijednostima volumena vode. Formule koje su korištene za dobivane vrijednosti navedene su u nastavku.

Dužina vodenih kanala:

$$L_{Vode} = \sum_{i=0}^8 L_i [\text{mm}] \quad (3.2)$$

Postotak sakupljanja:

$$F_{Dijela} = 100 * \frac{A_{Skupljanja}}{A_{Mjehura}} [\%] \quad (3.3)$$

Prosječna dužina skupljanja:

$$FL_{Pr osječs} = \frac{A_{Skupljanja}}{L_{Vode}} [\text{mm}] \quad (3.4)$$

Prosječni omjer šuplje sredine:

$$CR_{Pr osječs} = \frac{V_{Vode}}{L_{Vode} \cdot A_{Kanala}} \quad (3.5)$$

Gdje su:

$L_i$  – dužina pojedinog vodenog kanala,  $L_{Vode}$  – ukupna dužina svih vodenih kanala,  $F_{Dijela}$  – postotak skupljanja,  $A_{Skupljanja}$  – površina vodenog mjehura unutar proizvoda,  $A_{Mjehura}$  – površina vodenog mjehura izvan i unutar proizvoda,  $FL_{Prosječno}$  – prosječna dužina skupljanja,  $CR_{Prosječno}$  – prosječni omjer šuplje jezgre

Tablica 3.5. Podaci o izvedenim pokusima <sup>5</sup>

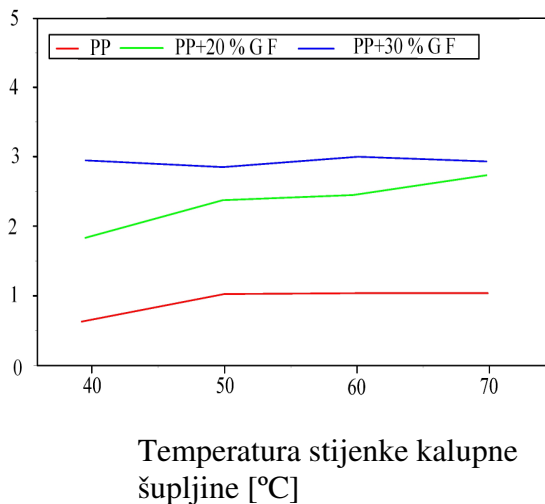
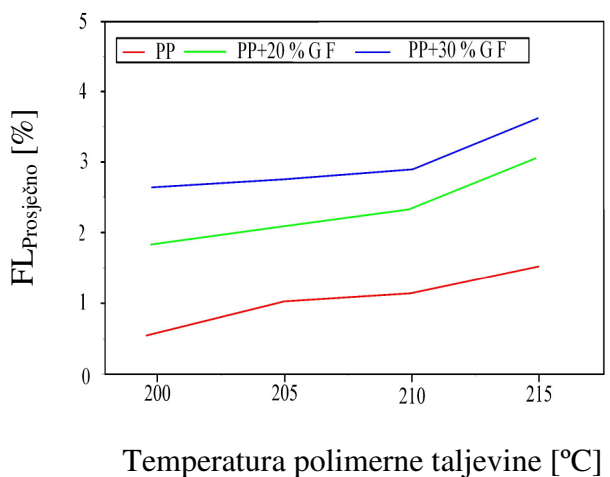
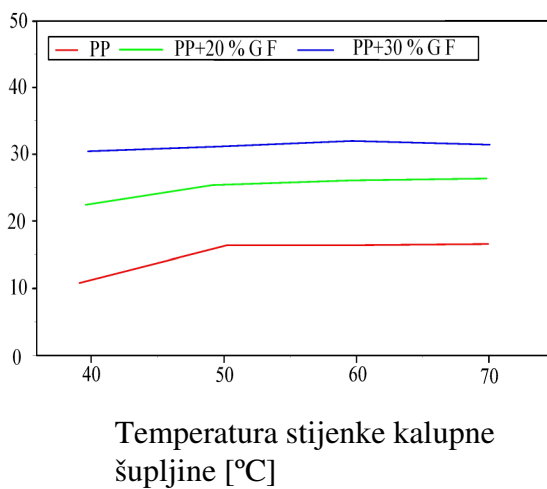
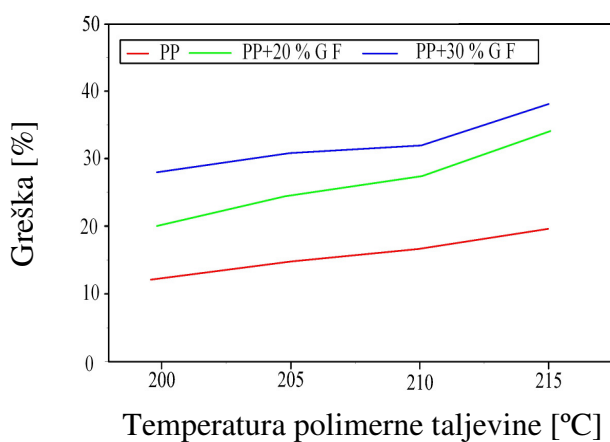
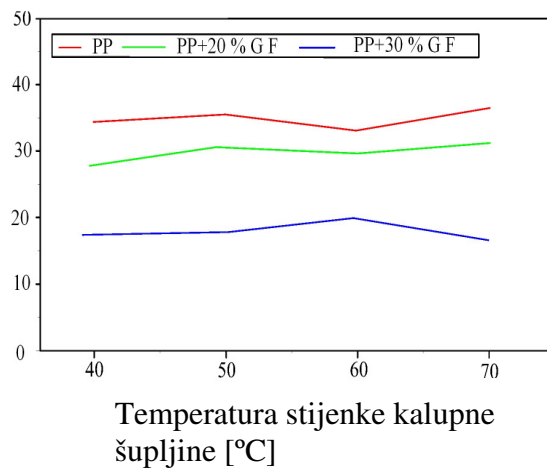
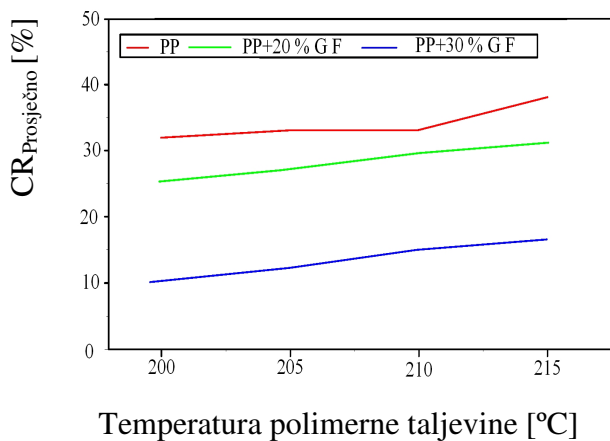
| Pokus | Parametar                                     | 1   | 2         | 3          | 4   |
|-------|---|-----|-----------|------------|-----|
| A     | Temperatura taljevine<br>[°C]                 | 200 | 205       | <b>210</b> | 215 |
| B     | Temperatura stijenke<br>kalupne šupljine [°C] | 40  | <b>50</b> | 60         | 70  |
| C     | Popunjenost kalupne<br>šupljine [%]           | 40  | 50        | <b>60</b>  | 70  |
| D     | Tlak ubrizgavanja [MPa]                       | 56  | <b>71</b> | 85         | 99  |
| E     | Temperatura vode [°C]                         | 30  | <b>40</b> | 50         | 60  |
| F     | Tlak vode [Mpa]                               | 9   | <b>10</b> | 11         | 12  |
| G     | Vrijeme odgode [s]                            | 0,1 | 0,8       | <b>1,6</b> | 2,4 |
| H     | Vrijeme držanja<br>naknadnog tlaka vode [s]   | 10  | 15        | <b>20</b>  | 25  |
| I     | Put doziranja [mm]                            | 43  | <b>44</b> | 45         | 46  |

Podebljani parametri proizvodnje koji su navedeni u prošloj tablici pokazuju optimalne parametre koji su dobiveni drugim pokusom.

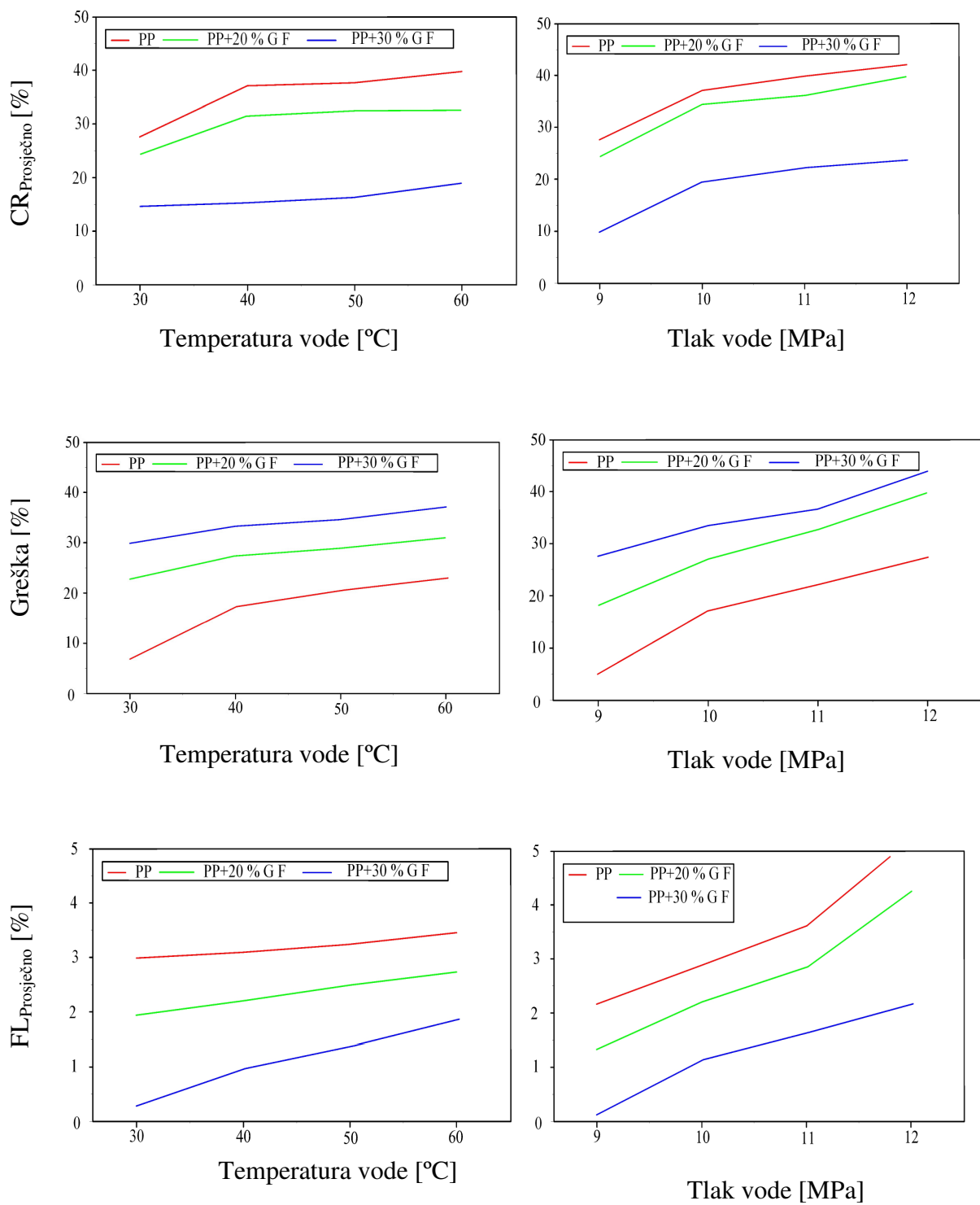
U pokusima su se koristila tri materijala: neojačani polipropilen i polipropilen s 20 i 30 % staklenih vlakana. Prilikom provedbe pokusa ustanovljeno je da se greške u otprescima puno češće javljaju kod materijala koji imaju veći postotak staklenih vlakana.

### 3.14. Utjecaj parametara preradbe<sup>5</sup>

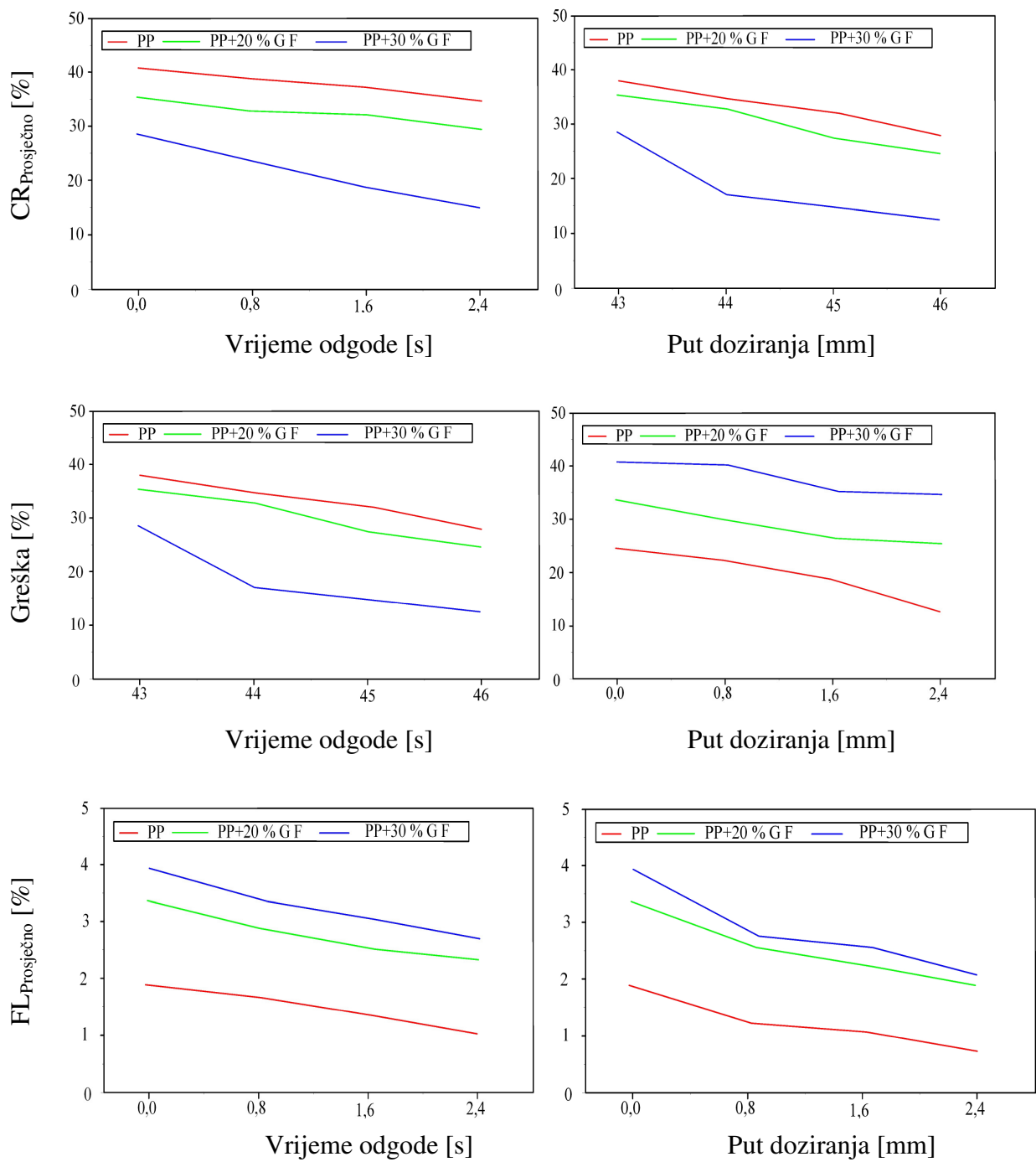
Promatrani su različiti parametri preradbe u smislu njihovog utjecaja na pojavu grešaka kod otpresaka. Protočni vodeni kanal se koristio za dobivanje kompozitnih dijelova. Za proizvodnju dijelova su se koristili parametri koji su navedeni podebljano u tablici 3.5. Poslije ubrizgavanja otpresci su skenirani i oblik je obrađivan s pomoću računala, dobiveni su podaci o postotku skupljanja, prosječnoj dužini skupljanja i prosječnom omjeru šuplje sredine. Pogotovo je važno postizanje dovoljno velikog prosječnog omjera šuplje sredine jer on najviše utječe na kasnija mehanička svojstva proizvoda. Promjenom parametara u svakom pokusu, može se bolje utvrditi utjecaj svakog parametra preradbe na kvalitetu dobivenog proizvoda. Na promatrano nastajanje grešaka najviše utječu tlak vode, vrijeme odgode djelovanja vodenog tlaka i količina ubrizgane taljevine. Najčešće greške nastaju kada se kombinira visoki vodeni tlak s malom količinom ubrizganog materijala i kratkim vremenom odgode djelovanja vodenog tlaka. Dobiveni podaci su prikazani u dijagramima na slikama 3.23, 3.24 i 3.25.



Slika 3.23. Utjecaj temperature taljevine i temperature stijenke kalupne šupljine na svojstva otpresaka



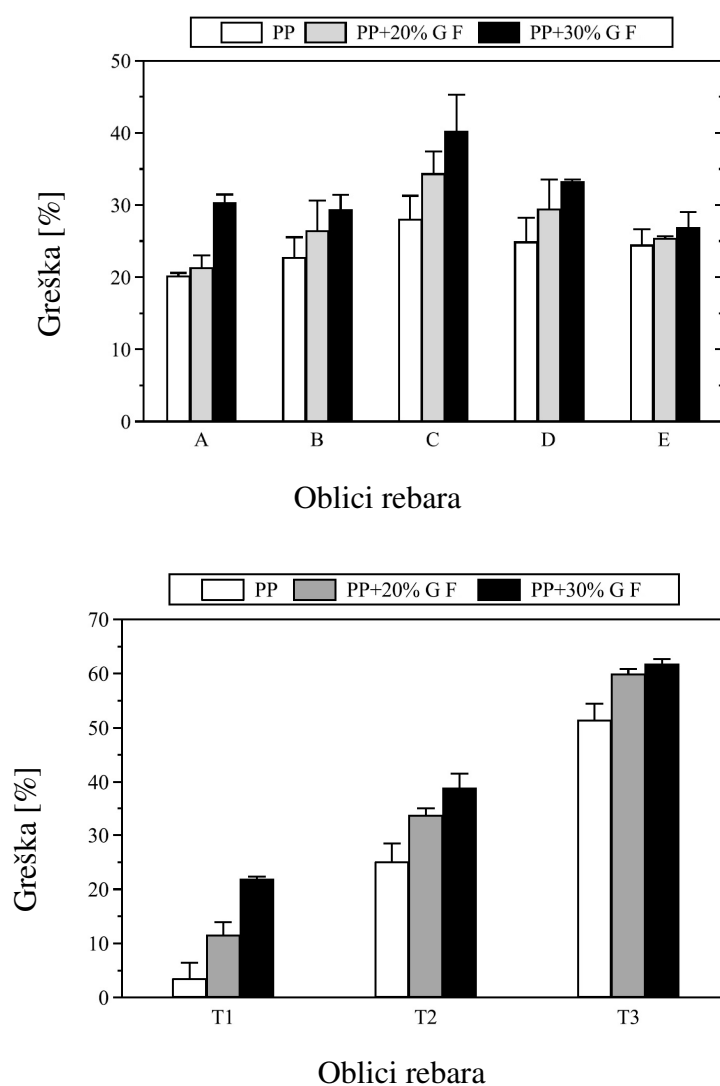
Slika 3.24. Utjecaj temperature i tlaka vode na svojstva otpresaka



Slika 3.25. Utjecaj vremena odgode i puta doziranja na svojstva otpresaka

### 3.15. Utjecaj geometrije vodenih kanala i debljine stijenke proizvoda <sup>5</sup>

Vodeni kanali su napravljeni za vođenje vodenog mjehura i uz to za povećanje krutosti proizvoda. Mehanička svojstva vodenog kanala ovise o njegovoj veličini i obliku i o vodenoj jezgri koja je u njemu. U ovom pokusu se dodatno promatrao utjecaj oblika vodenih kanala na mehanička svojstva. Svi vodeni kanali imaju površinu od 75 mm<sup>2</sup> i debljinu od 2 mm. Iz dobivenih uzoraka, kružni i pravokutni oblici kanala imaju slične razine grešaka uzrokovanih tlakom vode, dok trapezni oblik vodenih kanala pokazuje veću tendenciju prema stvaranju grešaka. Dijagram učestalosti pojave grešaka ovisno o tipu rebra prikazan je na slici 3.26.

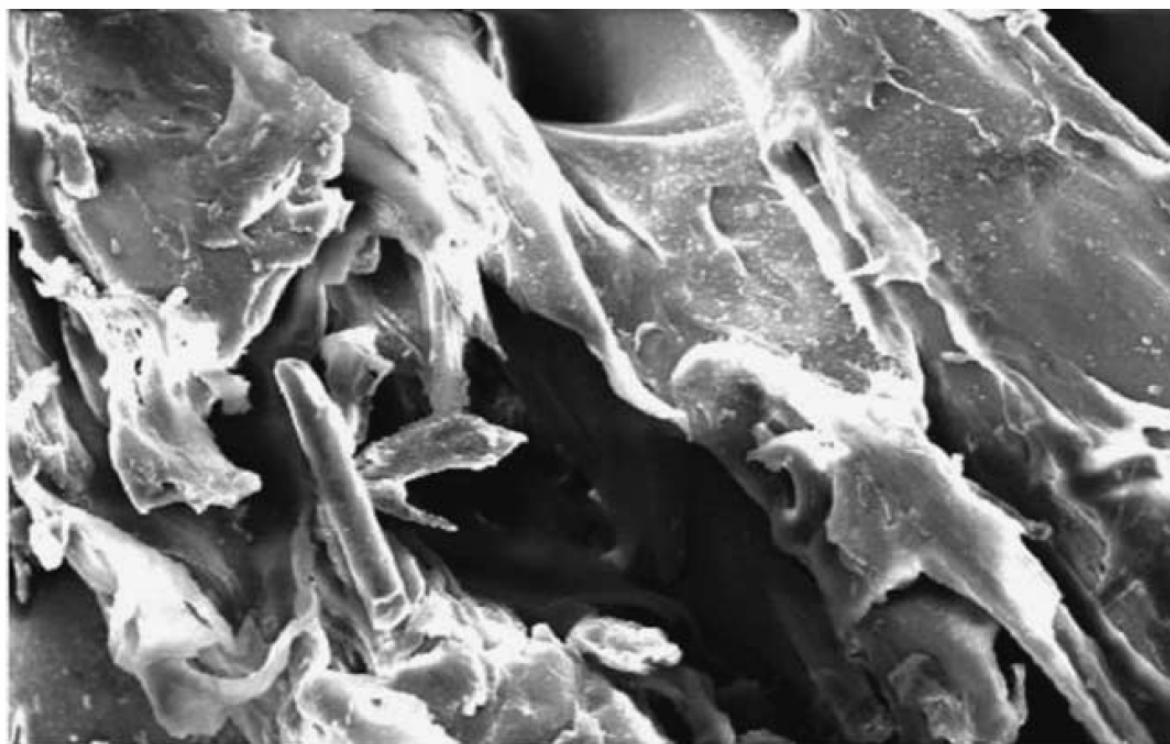


Slika 3.26. Postotak greške u ovisnosti o obliku rebra

U dijagramu su prikazani postoci grešaka koji nastaju kod pojedinih vrsta rebara i kod materijala koji su se koristili u proizvodnji. Oblici navedenih rebara (A, B, C, D, E, T1, T2, T3) prikazani su na slici 3.21.

### 3.16. Mikroskopsko ispitivanje kompozitnih otpresaka <sup>5</sup>

Unutarnja površina vodenih kanala nastalih poslije injekcijskog prešanja s pomoću vode se promatrala pod elektronskom mikroskopom. Slika 3.27 prikazuje sliku dobivenu elektronskim mikroskopom. Jasno je vidljivo da su dobiveni dijelovi podloženi procesu odljepljivanja polimera od staklenih vlakana i procesu delaminacije. Tijekom injekcijskog prešanja s pomoću vode, voda pod visokim tlakom ulazi u jezgru materijala. Istodobno voda preuzima toplinu iz polimerne taljevine koja je u kalupu i time povećava temperaturu. Kod takvog hidrotoplinskog slučaja kompozitni materijali mogu biti podložni procesu diferencijalnog bubrenja koje dovodi do osmotskog pucanja na međufazi.



100 μm

Slika 3.27. Mikroskopski prikaz strukture unutarnjeg kanala <sup>5</sup>

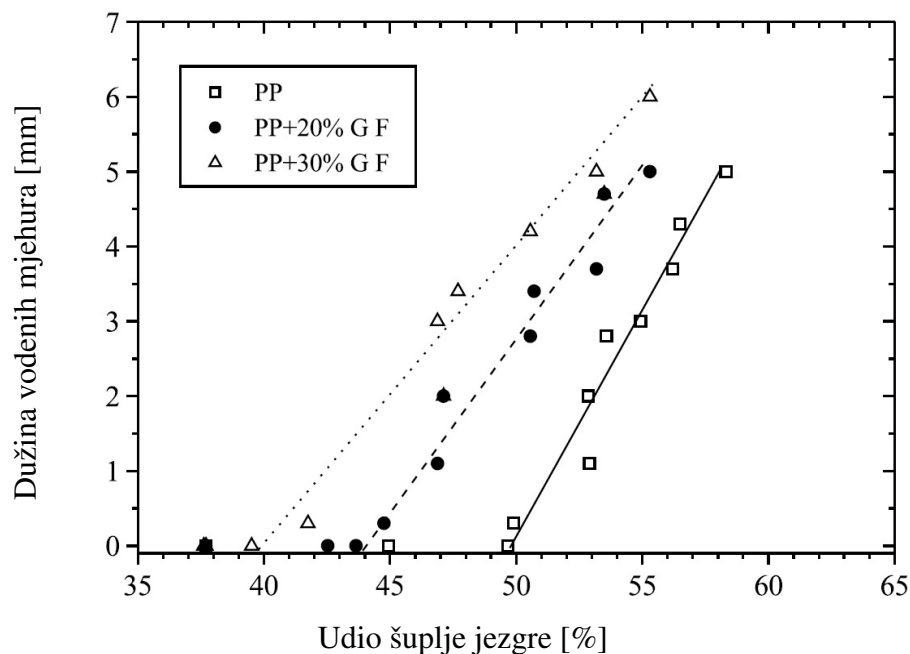


### 3.17. Mehanizam formiranja vodenih mjehurića <sup>5</sup>

Pri injekcijskom prešanju s pomoću vode tri faktora mogu utjecati na oblikovanje mjehurića u dobivenim dijelovima. Prvi parametar je skupljanje polimernih materijala. Kod injekcijskog prešanja s pomoću vode, kalupna šupljina se najprije puni s polimerom nakon čega slijedi voda pod visokim tlakom. Tijekom naknadnog punjenja vodom, polimer koji se skružuje mijenja volumen, omogućujući vodi daljnje prodiranje. Što se više polimer skupi, to voda može bolje napredovati kroz materijal i uzrokovati mjehuriće. Drugi parametar koji utječe na dužinu vodene penetracije je viskoznost polimerne taljevine. Tijekom djelovanja vodenog tlaka, voda se giba smjerom koji joj pruža manji otpor. Dokle voda prodire u kalupnu šupljinu, sadržaj kalupne šupljine se hladi i time se značajno povisuje viskoznost polimerne taljevine. Vodi time postaje teže prodirati u polimer. Drugi faktor koji utječe na formiranje mjehura je otpor prema toku vode u vodenom kanalu koji konačno određuje redosljed popunjavanja. Što je veći otpor prema protoku vode u vodenom kanalu i što je niži otpor prema toku u ploči, veći će biti udio vodenih mjehurića.

Kod kompozitnih materijala, kao što je polipropilen sa staklenim vlaknima, lako dolazi do stvaranja mjehurića. Razlog ovom ponašanju može biti taj što staklena vlakna dodatno povisuju viskoznost materijala. Kod jače punjenih materijala voda ne može puno pomicati materijal, nego ga gura da popuni kalupnu šupljinu. Problemi s mjehurima nastaju kod popunjavanja ploče na kojoj se nalaze rebra, zato jer voda najprije popuni rebro, a tek zatim se počinje širiti u ostatak ravne ploče. Za ovaj proces mora biti osiguran dostatan vodeni tlak. Povećanje tlaka vode pomaže vodi pri prodiranju kroz polimer. Povećanje temperature stijenke kalupne šupljine omogućuje polimeru da dulje ostane topao i da ima nižu viskoznost.

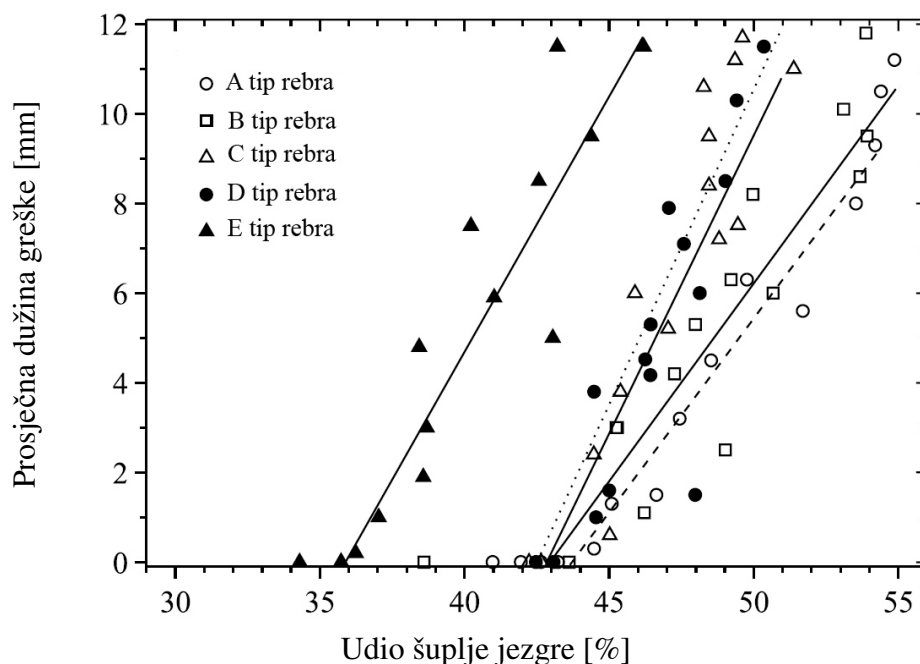
Postoji veza između dužine vodenih mjehura izvan vodenog kanala i udjela šuplje jezgre. Slika 3.28 prikazuje dužine vodenih mjehura i udjela šuplje jezgre za tri materijala: neojačanog polipropilena i polipropilena s 20 i 30 % staklenih vlakana.



Slika 3.28. Ovisnost dužine vodenih mjehura o udjelu šuplje jezgre za različite materijale <sup>5</sup>

Jasno se može uočiti točka prijelaza za svaki materijal ispod koje je dužina vodenih mjehura jednaka nuli i iznad koje se veličina vodenih mjehura naglo povećava. Kod neojačanog materijala je vidljivo da teže dolazi do stvaranja vodenih mjehura, pa je moguće postići veće udjele šuplje jezgre.

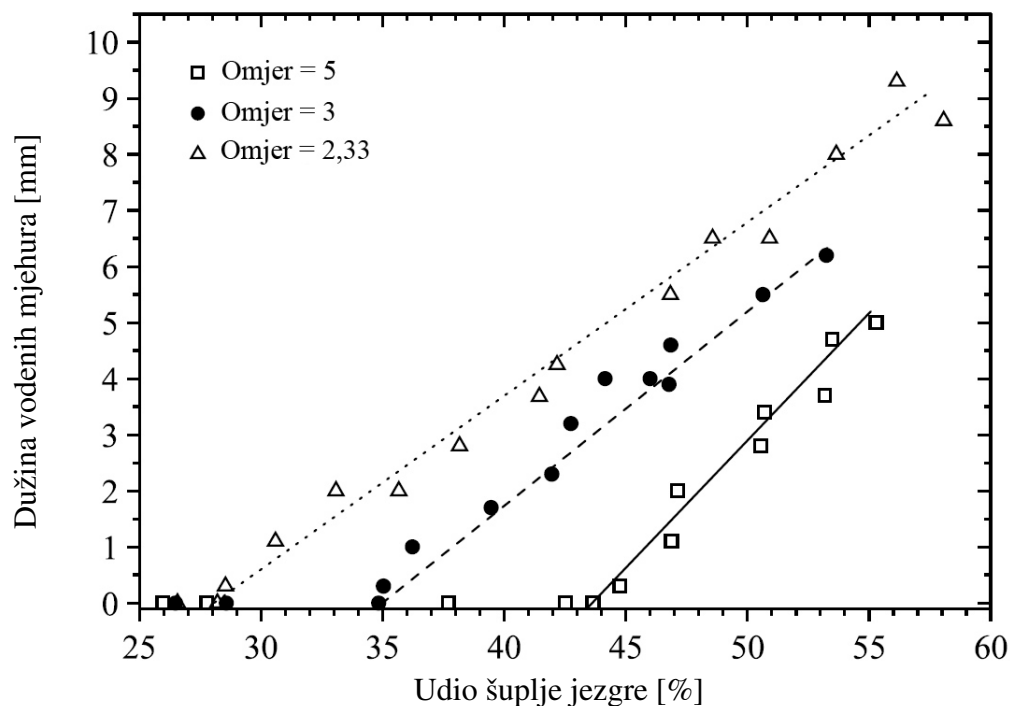
Za uzorke koji imaju različite geometrije rebara, dijagram ovisnosti dužine vodenih mjehura o udjelu šuplje jezgre dan je na slici 3.29.



Slika 3.29. Zavisnost dužine vodenih mjehura o udjelu šuplje jezgre za različite tipove rebara <sup>5</sup>

Polukružni i pravokutni vodeni kanali imaju slične razine udjela šuplje jezgre, za razliku od trapeznih oblika s okruglim vrhom gdje se mjehuri javljaju kod niskih razina. Uzrok ovoj pojavi može biti taj što je kut između rebra i osnovne ravnine ploče  $90^\circ$  kod polukružnih i pravokutnih kanala, dok je kut kod trapeznih oblika puno veći. Kritični udio šuplje jezgre se povećava ako se doda mali rub na vrh vodenog kanala, jer vodeni mjehur teško prodire u male rubove. Mala količina polimerne taljevine se treba koristiti za dobivanje proizvoda s ovakvim rebrima.

Bitna je i veza između omjera visina-debljina dijela i udjela šuplje jezgre. Slika 3.30 prikazuje dobivene rezultate za omjere 5, 3 i 2,33 za dijelove kojima debljine stijenki iznose 1, 2 i 3 mm.



Slika 3.30. Ovisnost dužine vodenih mjehura o udjelu šuplje jezgre za različite omjere visine i debljine stijenka <sup>5</sup>

Vidljivo je da povećanjem omjera visina/debljina stijenke sklonost stvaranju vodenih mjehura se snižava i mogu se dobiti veći udjeli šupljih sredina.

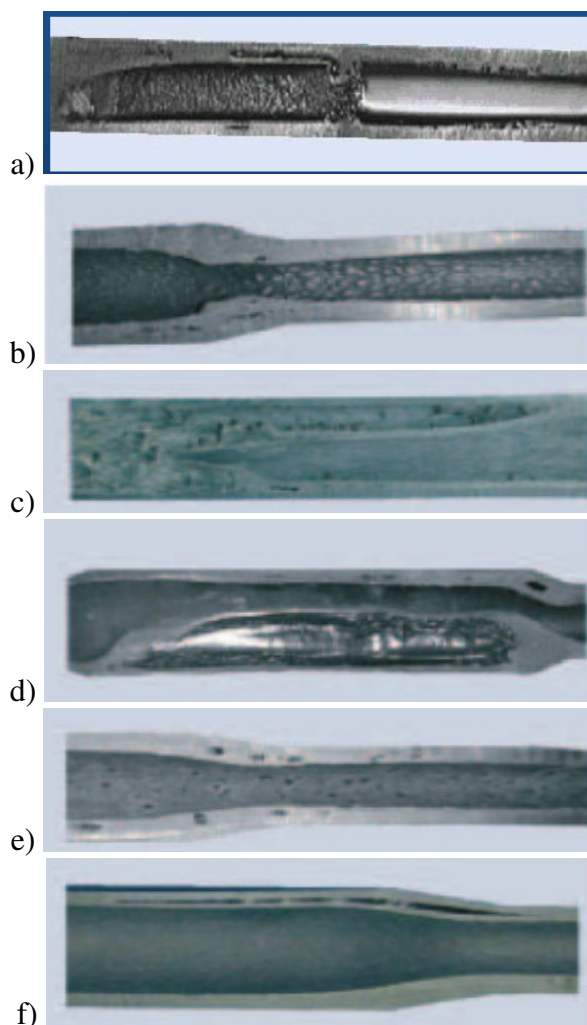
### 3.18. Greške na proizvodima koje nastaju pri injekcijskom prešanju s pomoću vode<sup>2</sup>

Pri postupku injekcijskog prešanja s pomoću vode javljaju se greške koje se ne susreću kod drugih postupaka injekcijskog prešanja. Ove greške se pojavljuju na proizvodima uglavnom kada optimalni parametri preradbe nisu zadovoljeni.

Tipične greške prikazane su na slici 3.31, a zovu se:

- djelomično oblikovan vodeni kanal zbog nastanka pare - slika 3.31 a)
- mjehurići - slika 3.31 b)
- odnošenje vlakana - slika 3.31 c)
- komore - slika 3.31 d)

- pore - slika 3.31 e)
- šupljine - slika 3.31 f)



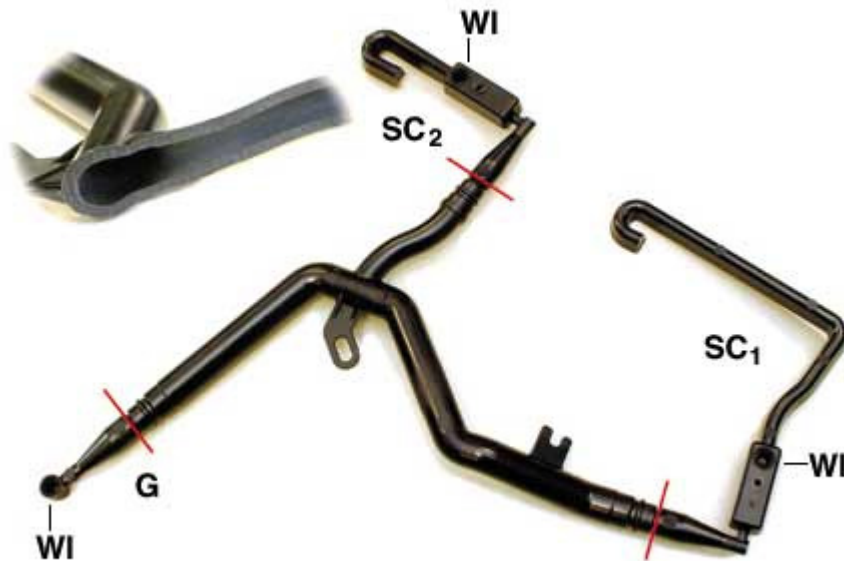
Slika 3.31. Oblici grešaka pri injekcijskom prešanju s pomoću vode

Djelomično oblikovan vodeni kanal zbog nastanka pare je posljedica presporog ubrizgavanja vode i time uzrokovanog nastanka vodene pare, koja zatim popunjava sredinu kao plin. Mjehurići i komore su posljedica difuzije pare u materijal, dok do nastanka šupljina dolazi zbog stvrdnjavanja taljevine kod niskog tlaka vode. Pore su posljedica presporog porasta tlaka, stijenka materijala očvrstne i previsok tlak vode ju polomi. Greške nisu vidljive s unutarnje strane proizvoda, zato je za njihovo utvrđivanje proizvode potrebno prerezati. Ukloniti ili spriječiti pojavu grešaka je jedino moguće korekcijom parametra injekcijskog prešanja s pomoću vode.

### 3.19. Dostignuća svjetskih proizvođača opreme za injekcijsko prešanje

#### 3.19.1. Postupak Watermelt<sup>3</sup>

Tvrtka Engel je razvila postupak nazvan *Watermelt* koji se koristi za proizvodnju cijevi za sustave hlađenja u automobilima. Ovi proizvodi se odlikuju svojom težinom koja je i do 50 % manja nego ona kod cijevi napravljenih od čelika. Slika 3.32 prikazuje cijev za hlađenje.



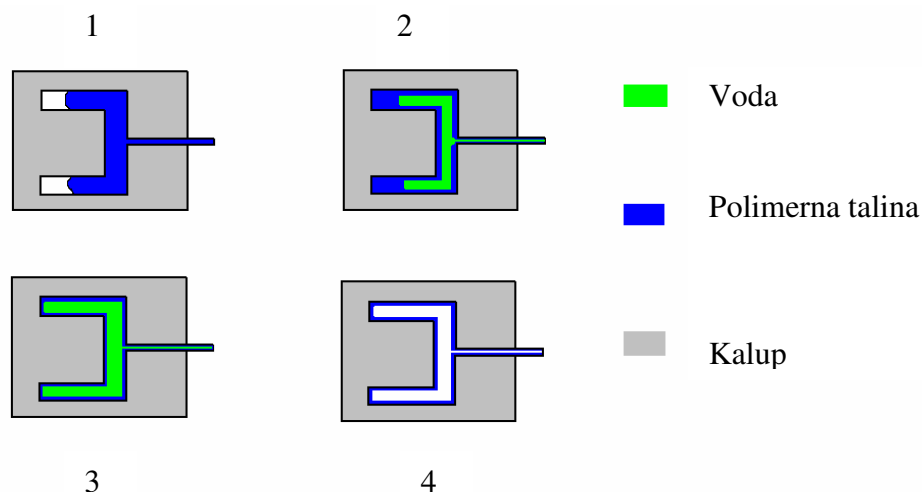
Slika 3.32. Cijev za sustav hlađenja u automobilu<sup>3</sup>

Cijev za sustav hlađenja u automobilu je dobivena procesom protoka vode kroz unutrašnjost proizvoda. Kalupna šupljina se najprije napuni s polimerom, a zatim se istovremeno otvara pomoćna kalupna šupljina SC<sub>1</sub> i voda ulazi kroz injektor koji je smješten blizu ušća. Kratko prije nego što vodena fronta koja napreduje dođe do grane koja vodi do druge pomoćne kalupne šupljine SC<sub>2</sub>, otvara se poklopac na toj šupljini, što dozvoljava ulazak viška polimera u nju. Ova sekvenca omogućuje lijep prijelaz iz ravne cijevi u razgranatu. Kada je popunjena cijela jezgra proizvoda uključuju se dodatni injektor koji se nalaze na krajevima svake grane, da se dobije šuplja cijev. Kratko prije završetka ciklusa, u sustav se upuhuje zrak koji izbacuje vodu. Kada se kalup otvori, zaostala voda koja je ostala u proizvodu, isparava zbog još uvijek visoke temperature.

Tri vodena injektora su bila potrebna za proizvodnju ove razgranate cijevi (25 mm promjer, 3-4 mm debljina stijenka) od poliamida s 30 % staklenih vlakana. Injektori WI su smješteni na označenim mjestima. Uljevni sustav i pomoćni optresci su odrezani na mjestima označenim crvenom bojom. Vrijeme ciklusa je oko 40 s.

### 3.19.2. Postupak Aquamould<sup>3</sup>

Postupak tvrtke Battenfeld injekcijskog prešanja s pomoću vode je nazvan *Aquamould*. Razvijen je na IKV institutu u Aachenu i dalje usavršen u Battenfeldu za potrebe industrijske proizvodnje. Poslije ubrizgavanja polimerne taljevine, injektira se voda. Voda osigurava da se kalupna šupljina u potpunosti popuni i osigurava potrebni naknadni tlak. Prije nego što se kalup otvori, vodeni tlak u kalupu se smanji i voda se ispušta. Najpovoljniji način izvođenja procesa ovisi o geometriji dijela, zahtijevanim mehaničkim svojstvima i vrsti materijala. Na slici 3.33 shematski je prikazan *Aquamould* postupak.



Slika 3.33 Shematski prikaz *Aquamould* postupka<sup>3</sup>

*Aquamould* modularni sustav se sastoji od sljedećih komponenti:

- vodene pumpe
- kontrole tlaka vode
- modula za injektiranje vode.

Jedinice za stvaranje vodenog tlaka su mobilne jedinice, koje su dostupne s izlaznim protocima od 60 do 100 l/h. Mobilna kontrolna jedinica se povezuje s ubrizgavalicom pomoću Aquamold konektora. Tlak vode se kontrolira s pomoću kontrolnog modula za regulaciju tlaka. Kompaktna izvedba ovih modula omogućuje njihovo smještanje blizu kalupa. Ovo smještanje omogućuje vrlo preciznu kontrolu tlaka, kao i smanjenu potrošnju vode. Nepropusni ventili se koriste za preciznu kontrolu vodenog tlaka. Pogodni su za niske i visoke volumenske protoke. Ventili se kontroliraju elektronski.

Neki primjeri ovog postupka prikazani su na slici 3.34.



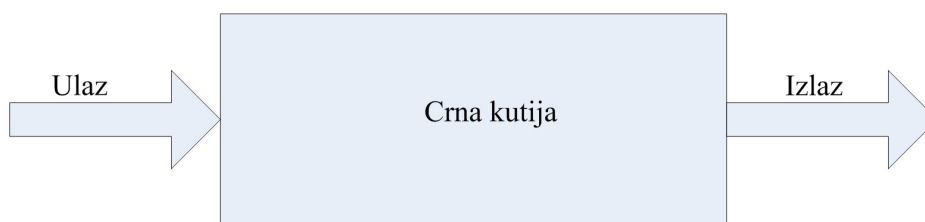
Slika 3.34. Primjeri *Aquamould* postupka<sup>3</sup>



## 4. RAZVOJ PROIZVODA <sup>6</sup>

Konstruktivno rješenje nekog stroja, uređaja, konstruktivna rješenja sklopova i ugradbenih grupa i konačno konstruktivna rješenja oblika svih pojedinačnih dijelova, utvrđuje konstruktor na osnovi postavljenih zahtjeva. Na prvom mjestu to su zahtjevi funkcije (svrhe). To znači da konstruktor mora ponajprije oblikovati funkcionalno ispravno. Zatim mora uzimati u obzir izradbu i obradbu, a to znači da mora oblikovati i tehnološki ispravno, što se odnosi kako na izradbu i obradbu dijelova, tako isto i na montažu. Osim funkcionalno i tehnološki ispravnog konstruktivnog oblikovanja, konstruktivnim oblikovanjem moraju biti zadovoljeni i ekonomski zahtjevi. Osim toga, potrebno je ispuniti i zahtjeve održavanja, posluživanja, pouzdanosti, kao i ekološke zahtjeve.

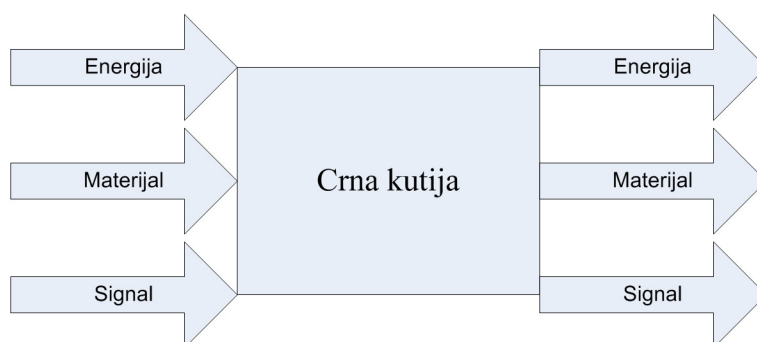
Predmet djelatnosti konstruktora je tehnički proizvod. Pod konstruiranjem treba razumjeti misaonu realizaciju tehničke ideje u praktično izvediv, upotrebljiv i ekonomski opravdan tehnički proizvod. Konstruiranje se sastoji od misaone realizacije funkcionalne strukture koja omogućuje izvršenje ukupne funkcije tehničkog proizvoda. Tehnički proizvod promatra se pri tome kao „crna kutija – nepoznanica“ u kojoj se vrši pretvorba ulaznih veličina u izlazne veličine, kako je prikazano na slici 4.1. Pri tome je konstrukcijskim procesom potrebno riješiti strukturu kao količinu elemenata sustava koji su relacijama međusobno povezani.



Slika 4.1. Crna kutija <sup>6</sup>

Tehnička funkcija je svojstvo tehničkog proizvoda da određenu količinu ulaznih veličina, pod određenim uvjetima, prevede na određenu količinu izlaznih veličina. Funkcija opisuje proces koji realizira tehnički proizvod, a sastoji se od određenog broja operacija. Općenito može svaki tehnički sustav na osnovi vlastite strukture ispunjavati veći broj funkcija koje međusobno stoje u određenim relacijama.

Tehnički proizvodi služe u nekom tehničkom procesu u kojem se vrši bilo transport, bilo pretvorba energije, materijala ili podataka. Prema tome, u tehničkom sustavu postoji transport ili pretvorba energije, materijala ili podataka. Te pretvorbe moraju biti određene podacima o kvaliteti, kvantiteti i troškovima. Na slici 4.2 prikazan je zadatak razvijanja konstrukcije kao sustava u kojem se vrši istodobna pretvorba energije, materijala i podataka. Rješenje zadatka nije poznato. Zadatak se može opisati na osnovi ulaznih i izlaznih podataka, rješenje se prikazuje kao nepoznanica – „crna kutija“ .



Slika 4.2. Konstrukcija kao sustav u kojem se vrši pretvorba veličina <sup>6</sup>

To zapravo znači da se zadatak u kojem se, kako je rečeno, može vršiti samo tok ili pretvorba energije, materijala i signala, mora potražiti u „crnoj kutiji“. Za to traženo rješenje, ako se promatra kao sustav, mora postojati jednoznačna povezanost između ulaza i izlaza s mogućnošću reprodukcije. Ta povezanost između ulaza i izlaza je zapravo željena promjena signala, energije, materijala na ulazu u odnosu na izlaz. Željeno zbivanje koje se odvija u uzročnoj zavisnosti između ulaza i izlaza radi izvršenja zadatka, naziva se funkcijom.

Pri projektnoj razradi potrebno je uzimati u obzir kako tehničke, tako i ekonomske zahtjeve. Dosta je teško sve zahtjeve iz zadatka istovremeno uzimati u obzir, da bi već kod prve projektne razrade bili ispunjeni svi postavljeni zahtjevi. Zato se u prvoj projektnoj razradi počinje s manjim brojem zahtjeva. Tada se ovako razrađeni pretprojekt iterativnim postupkom poboljšava. To znači da se razradom većeg broja iteracija nastoji doći do optimalnog rješenja.

Osim nabrojenih osnova tehnološki ispravnog konstruktivnog oblikovanja, pri konstruktivnom oblikovanju potrebno je voditi računa o ispravnom konstruktivnom oblikovanju u odnosu prema:

- utjecajima okoliša: prašine pijeska, prljavštine, vlage, morske vode, hladnoće, topline, zračenja, pritiska, korozije
- ekonomskim utjecajima: minimalnim troškovima izradbe, montaže, kontrole, skladištenja, transporta
- utjecajima trošenja, vijeka trajanja, težine, volumena.

Prije nego što se pristupi traženju rješenja, potrebno je raščlaniti sve uvjete koji pri rješavanju zadatka moraju biti uzeti u obzir. Zahtjevi koji mogu biti postavljeni vezani za zadatak su:

- a) Učinak. Od svakog proizvoda se zahtijeva određeni učinak. Isti učinak može se ostvariti na različite načine.
- b) Mehanička opterećenja. Ovdje je riječ o silama, titrajima, udarima koja proizlaze iz načina primjene. Prilikom razrade zadatka moraju biti utvrđena sva opterećenja.
- c) Klimatski i kemijski utjecaji. Okolica mjesta upotrebe može imati jak utjecaj na konstrukciju. Tehnički proizvod mora biti postojan na vanjske utjecaje ako što su: visoke i niske temperature, kemijski utjecaji plinova, para, korozivni utjecaj vode, kiselina, lužina.
- d) Prostorni utjecaji. Ograničenje prostora.
- e) Veličina i težina. Iz ekonomskih razloga mora se nastojati da su dimenzije proizvoda što manje, ako zadatkom nisu postavljena ograničenja. Zahtjev za što manjom potrebom prostora i što nižim troškovima materijala ima primarni značaj za konstrukciju.
- f) Mogućnost transporta. Pri oblikovanju tehničkog proizvoda moraju se uzimati u obzir različite mogućnosti transporta. Pri tome imaju troškovi transporta veliki utjecaj.
- g) Rukovanje. Pri razmatranju problematike rukovanja potrebno je obratiti pažnju na to hoće li s proizvodom rukovati priučeni ili kvalificirani radnici.
- h) Održavanje. Održavanje mora biti jednostavno, proizvod ili dio se mora moći jednostavno zamijeniti s novim proizvodom ili dijelom.
- i) Vijek trajanja. Za konstruktora je važno da ispravnim dimenzioniranjem, pravilnim izborom materijala i drugim mjerama osigura proizvodu dug vijek trajanja. Bilo bi najbolje kad bi svi dijelovi nekog sklopa imali isti vijek trajanja.

Međutim, pojedini dijelovi najčešće imaju pod utjecajem mehaničkog, toplinskog ili kemijskog djelovanja, kraći vijek trajanja. Mora se konstruktivno osigurati mogućnost lagane zamjene.

- j) Sigurnost rada. Pouzdanost tehničkog proizvoda u trajnom pogonu je svojstvo koje se zahtjeva od svakog kvalitetnog proizvoda. Neometano izvršavanje radnih učinaka ovisi o pouzdanosti i sigurnosti djelovanja svih onih konstruktivnih elemenata koji sudjeluju u ostvarenu radnih učinaka. Od konstruktora se zato zahtijeva da pri konstruktivnom oblikovanju obrati pozornost na one nepovoljne utjecaje koji bi mogli dovesti do preopterećenja ili trošenja.
- k) Broj izradaka. Za konstruktora broj izradaka ima presudnu važnost. Broj izradaka utječe na izbor materijala i tehnologije, a na taj način utječe na sam način konstruktivnog oblikovanja.
- l) Izgled. Estetsko oblikovanje predstavlja danas jedan od bitnih zahtjeva kojima također treba udovoljiti. Ti zahtjevi se pretežno odnose na vanjski izgled, tako da ostaje samo funkcionalno oblikovanje unutrašnjosti proizvoda.
- m) Ukupni troškovi. Na rad konstruktora ukupni troškovi imaju posebno velik utjecaj. Konstruktor mora nastojati da izbor materijala i način oblikovanja ekonomski tako podesi da ukupna cijena proizvoda bude konkurentna.

#### **4.1. Tijek procesa konstruiranja <sup>6</sup>**

Proces konstruiranja se može prikazati kroz faze, od kojih prva obuhvaća koncipiranje, druga projektiranje, a treća konstrukcijsku razradu.

Koncipiranje predstavlja onaj dio procesa konstruiranja pri kojem se, nakon raščišćavanja svih podataka vezanih za zadatak, traženjem i pronalaženjem odgovarajućih načela rješenja, utvrđuje u načelu rješenje zadatka. Projektiranje je onaj dio procesa konstruiranja pri kojem se, nakon raščišćavanja zadatka i koncipiranja, utvrđuje funkcionalno i ekonomsko rješenje zadatka u takvom opsegu da je daljnja konstruktivna razrada moguća. Konstruktivna razrada predstavlja posljednju fazu procesa konstruiranja, u kojoj se razrađuje tehnička dokumentacija, tehnički i ekonomski najpovoljnijeg rješenja.

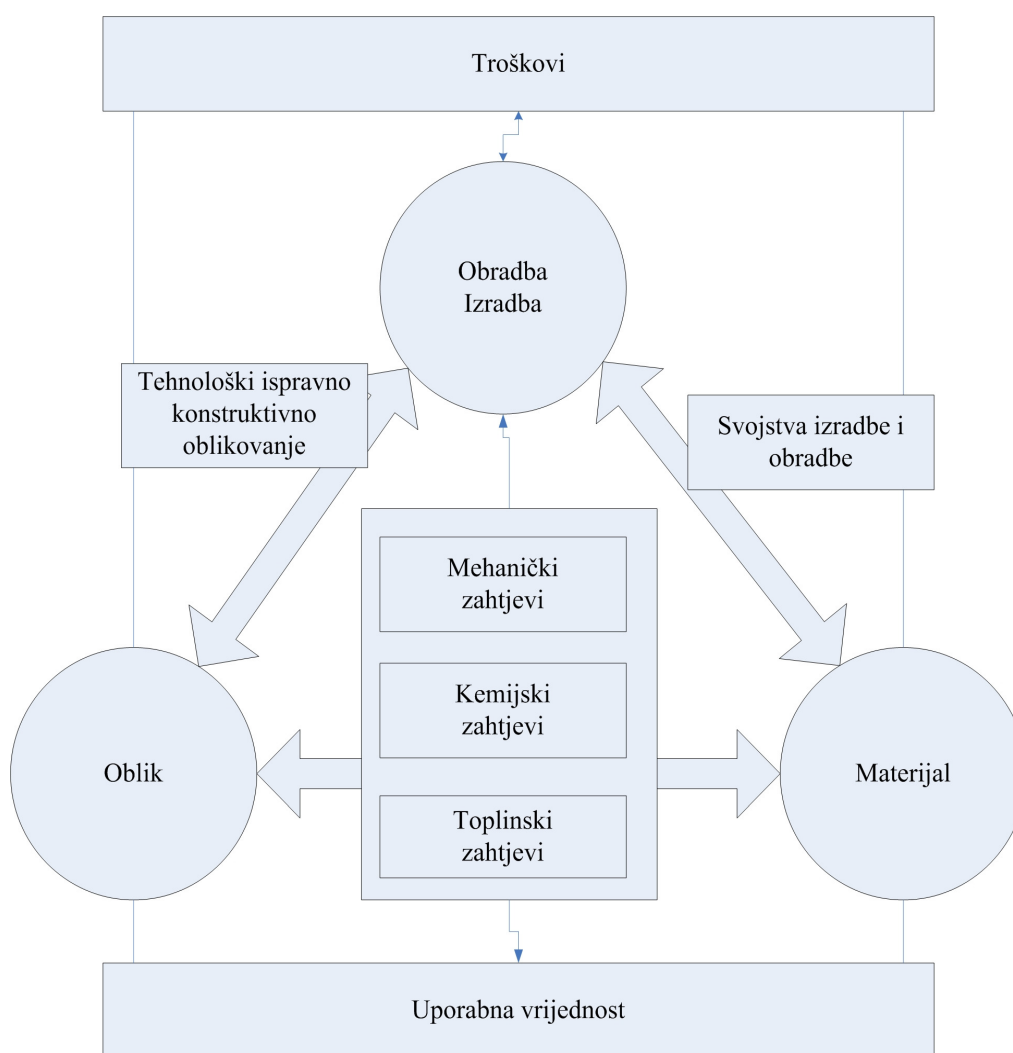
#### **4.2. Izbor materijala <sup>6</sup>**

Pri projektiranju i konstruiranju proizvoda više od 70 % utjecaja propisuje se troškovima materijala. Zato je potrebno poznavati svojstva tehničkih materijala. Svojstva se ne bi trebala samo odnositi na mehanička, tehnološka i kemijska svojstva materijala, već i trebala obuhvatiti ekonomska gledišta kao što su cijene, troškovi obradbe i mogućnost nabave. Izbor materijala predstavlja pri svakom konstruktivnom zadatku tehničko-ekonomski problem. Sadržaj tog problema određen je nizom zahtjeva koji se zbrajaju. Utjecajni faktori se mogu grupirati u četiri grupe:

- Zahtjevi vezani za upotrebu konstrukcije
- Zahtjevi vezani za oblikovanje
- Zahtjevi vezani za izradbu i obradbu
- Ekonomski zahtjevi.

Zahtjevi vezani za upotrebu konstrukcije proizlaze iz željene funkcije i uvjeta pogona. Konstruktor ih mora kompletno i kvantitativno uzeti iz liste zahtjeva. Specificiranjem zahtjeva u minimalne, maksimalne i nazivne, dobiva se mogućnost vrednovanja pomoću kojeg može biti

provjeren odabrani izbor materijala. Zahtjevi vezani za oblikovanje proizlaze dijelom iz liste zahtjeva, a dijelom iz rješenja koje, počevši od načela preko koncepcije, dovodi do projekta. Zahtjevi za izbor materijala, vezani za uvjete na izradbu i obradbu, proizlaze iz načela izradbe i obradbe. Između zahtjeva vezanih za konstruktivno oblikovanje, izradbu i obradbu, postoje međusobno izmjenični odnosi. Poznavanje ovih odnosa i njihovo poštivanje odlučuje o vrijednosti proizvoda. Za izbor jednog od najvećeg broja tehnički prihvatljivih materijala mjerodavni su ekonomski zahtjevi. Ekonomski zahtjevi idu uvijek zajedno s već spomenutim zahtjevima vezanim za upotrebu, oblikovanje, izradbu i obradbu. Mnogobrojnost i uzajamno djelovanje utjecajnih faktora otežava u praksi postizanje ekonomsko-tehnički povoljnih rješenja, kako prikazuje slika 4.3.



Slika 4.3. Kompleksnost izbora materijala <sup>6</sup>

Izbor materijala ima odlučujući utjecaj na:

- Dimenzije izradaka
- Oblik i tehnologiju dobivanja oblika
- Način povezivanja (spajanja)
- Vijek trajanja, uvjetovan trenjem i trošenjem i otpornošću na koroziju.

#### 4.3. Lista zahtjeva za crijep kolektor

U tablici 4.1 je dana lista zahtjeva koji su postavljeni na crijep kolektor. Zahtjevi su podijeljeni po kategorijama i za svaku kategoriju su razmotreni utjecaji na oblik, materijal i postupak izradbe.

Tablica 4.1. Lista zahtjeva za crijep kolektor

| Kategorija                    | Zahtjev  | Utjecaj na oblik | Utjecaj na materijal | Utjecaj na izradbu |
|-------------------------------|--|------------------|----------------------|--------------------|
| Učinak                        | Grijanje vode na 80 °C                             | Velik            | Velik                | Velik              |
| Mehanička opterećenja         | Što niža   | Velik            | Velik                | Mali               |
| Klimatski i kemijski utjecaji | Proizvod mora biti otporan na utjecaje             | Mali             | Velik                | Mali               |
| Prostorni utjecaji            | Prostor je definiran montažom ostalih crjepova     | Velik            | Mali                 | Velik              |
| Veličina i težina             | Veličina mora biti ista kao i kod kupovnog crijepa | Velik            | Mali                 | Velik              |

Tablica 4.1. Nastavak

| Kategorija           | Zahtjev                               | Utjecaj na oblik | Utjecaj na materijal | Utjecaj na izradbu |
|----------------------|---------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------|
| Mogućnost transporta | Transportiranje na paletama           | Velik            | Mali                 | Mali               |
| Rukovanje            | Jednostavan za montažu                | Velik            | Mali                 | Mali               |
| Održavanje           | Jednostavan za održavanje             | Velik            | Velik                | Velik              |
| Vijek trajanja       | 30 godina                             | Mali             | Velik                | Mali               |
| Sigurnost rada       | Ne smije propuštati vodu na spojevima | Velik            | Velik                | Velik              |
| Broj izradaka        | Milijun                               | Velik            | Velik                | Velik              |
| Izgled               | Isti kao kupovni crijep               | Velik            | Velik                | Velik              |
| Ukupni troškovi      | 2,5 puta veći od standardnog crijepa  | Mali             | Velik                | Velik              |

Kako je vidljivo iz tablice 4.1, najveći zahtjevi su na oblik proizvoda. Za oblik proizvoda je u skoro svim kategorijama naveden veliki utjecaj. To znači da će se morati najprije riješiti problemi vezani za oblik proizvoda, a onda će se naknadno odabrati materijal i postupak preradbe.

#### 4.4. Proizvodno oblikovanje otpreska <sup>7</sup>

Pod proizvodnim oblikovanjem proizvoda se podrazumijeva oblikovanje proizvoda na način da ga je moguće izraditi s predviđenim postupkom proizvodnje. Postupak proizvodnje koji je zadan za izradu diplomskog zadatka je injekcijsko prešanje s pomoću vode. Za oblikovanje proizvoda potrebno je poznavati sva svojstva postupka proizvodnje i prema njima oblikovati proizvod.



Općenito, postoji nekoliko temeljnih pravila oblikovanja s obzirom na postupak injekcijskog prešanja:

- Postići što tanje stijenke
- Rebrasta ukrućenja oblikovati s obzirom na zahtjeve postupka preradbe
- Izbjegavati veće paralelne površine
- Izbjegavati nagle prijelaze u debljinama stijenki
- Izbjegavati gomilanje masa
- Osigurati potrebna skošenja u smjeru vađenja otpreska iz kalupne šupljine
- Izbjegavati podreze
- Provjeriti jesu li pri oblikovanju otpreska iskorištene sve mogućnosti koje pruža postupak preradbe.

Injekcijsko prešanje s pomoću vode je kompliciran i kompleksni proces koji uključuje nekoliko faza. Za potrebe ovog rada, proces injekcijskog prešanja s pomoću biti će podijeljen na:

- Faza volumnog popunjavanja kalupne šupljine polimerom
- Faza djelovanja vode i naknadnog tlaka vode
- Faza uklanjanja vode
- Faza pečačenja uljevnog sustava
- Faza vađenja otpreska iz kalupne šupljine.

Svaka od navedenih faza ima značajan utjecaj na oblikovanje otpreska. Analiziranjem pojedine faze injekcijskog prešanja s pomoću vode dolazi se do stanovitih problema koje je potrebno riješiti tijekom proizvodnog oblikovanja otpreska.

#### 4.4.1. *Oblikovanje s obzirom na fazu volumnog popunjavanja kalupne šupljine polimerom*

Postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode je poseban po tome jer kalupnu šupljinu treba najprije djelomično popuniti s polimernom taljevinom, a zatim u još vruću taljevinu ubrizgati temperiranu vodu pod tlakom. Oblik ušća, kao i njegov položaj bitno utječu na mogućnost izradbe proizvoda. Iz istraživanja koja su vršena na IKV institutu u Aachenu, a koja su opisana u teorijskom dijelu ovog rada, može se zaključiti da vodeni tlak treba djelovati u smjeru normale

širenja šupljine koju se želi izraditi. Budući da crijep kolektor ima uzdužnu šupljinu, jedini način dobivanja te šupljine je bočni položaj ušća, preko kojeg treba u kalupnu šupljinu dovesti polimernu taljevinu i vodu pod tlakom.

Potrebno je odrediti volumen vode koju treba ubrizgati pod tlakom, a koji odgovara volumenu šupljine proizvoda. Volumen šupljine proizvoda će biti određen pomoću idejnih modela punog crijeva i crijeva kolektora u programskom paketu CATIA.

Određivanje mase polimera koju treba „odstraniti“ da se dobije šupljina:

$$m_s = m_{pc} - m_{ck} \quad (4.1)$$

gdje su:  $m_{pc}$  masa punog crijeva,  $m_{ck}$  masa crijeva kolektora i  $m_s$  masa polimera koju bi trebalo „odstraniti“ da se dobije šupljina.

$$m_s = 0,79 - 0,3329 = 0,457 \text{ kg}$$

Volumen šupljine u crijevu kolektoru:

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_{pm}} \quad (4.2)$$

gdje su:  $V_s$  volumen šupljine,  $\rho_{pm}$  gustoća polimernog materijala.

$$V_s = \frac{0,457}{1140} = 4,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Volumen polimernog materijala s kojim je potrebno napuniti kalupnu šupljinu:

$$V_{pm} = V_{pc} - V_s \quad (4.3)$$

gdje su:  $V_{pm}$  volumen polimernog materijala i  $V_{pc}$  volumen punog crijeva.

$$V_{pm} = 6,93 \cdot 10^{-4} - 4,01 \cdot 10^{-4} = 2,92 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

U fazi volumnog popunjavanja kalupne šupljine polimerom potrebno je popuniti 42 % kalupne šupljine polimernom taljevinom. Treba paziti da ne dođe do pečačenja ušća, jer bi se time onemogućilo djelovanje vodenog tlaka. Na ušću treba koristiti vrući uljevni sustav s ventilom za vodu kojeg treba posebno izraditi.

#### 4.4.2. Faza djelovanja vode i naknadnog tlaka vode

Faza djelovanja vode započinje otvaranjem vodenog ventila, a završava kada se sloj polimera nanese po cijeloj kalupnoj šupljini. Voda mora biti ubrizgana pod tlakom od oko 10 bar i temperature od oko 40 °C. Ovi podaci nisu egzaktni, nego su iskustveni. Za dobivanje optimalnih vrijednosti trebalo bi u stvarnosti izvršiti ispitivanja na kalupu i stroju. Na iznose temperature i tlaka vode utječe mnogo parametara, kao što su točnost izradbe kalupa, kvaliteta opreme s kojom se izvodi postupak, kvaliteta materijala itd. Utjecaje ovih parametara na iznose tlaka i temperature vode je teško odrediti, pa je teško računski odrediti tlak i temperaturu vode.

Faza djelovanja naknadnog tlaka vode započinje kada se sloj polimera nanese po cijeloj kalupnoj šupljini, a završava kada odljevak postigne temperaturu postojanosti oblika. Ova faza je bitna jer se djelovanjem tlaka vode u velikoj mjeri sprječava vitoperenje i skupljanje proizvoda zbog hlađenja. Tijekom ove faze kalup mora biti zatvoren.

Podaci potrebni za proračun vremena postizanja temperature postojanosti oblika: <sup>8</sup>

|   |   |
|---|---|
| - Karakteristična izmjera otpreska            | $s_o = 3 \text{ mm}$  |
| - Koeficijent oblika (ploča)                  | $K_o = 0$   |
| - Koeficijent oblika                          | $K_{U1} = 4/\pi$  |
| - Koeficijent unutrašnjosti                   | $K_{U2} = 8/\pi^2$  |
| - Temperatura taljevine                       | $T_T = 564 \text{ K (290 °C)}$                                      |
| - Temperatura stijenke kalupne šupljine       | $T_K = 343 \text{ K (70 °C)}$                                       |
| - Temperatura postojanosti oblika             | $T_{PO} = 435 \text{ K (162 °C)}$                                   |
| - Temperatura vode u šupljini proizvoda       | $T_V = 313 \text{ K (40 °C)}$                                       |
| - Koeficijent jednadžbe pravca $a_{ef}$ za PP | $a_1 = -0,0106 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| - Koeficijent jednadžbe pravca $a_{ef}$ za PP | $b_1 = 9,8494 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$               |

Koeficijent temperaturene vodljivosti PP + 30 % staklenih vlakana:

$$a_{ef} = a_1 \cdot T_K + b_1 \quad (4.4)$$

gdje je  $a_{ef}$  koeficijent toplinske difuznosti polipropilena s 30 % staklenih vlakana.

$$a_{ef} = -0,0106 \cdot 10^{-8} \cdot 343 + 9,8494 \cdot 10^{-8} = 6,2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Toplinski tok izmijenjen do postizanja temperature postojanosti oblika:

$$\Phi_{uk} = \Phi_v + \Phi_c + \Phi_p \quad (4.5)$$

gdje su:  $\Phi_{uk}$  ukupni izmijenjeni toplinski tok u procesu hlađenja,  $\Phi_v$  toplinski tok dobiven od vode,  $\Phi_c$  toplinski tok dobiven od čelika,  $\Phi_p$  toplinski tok dobiven od polimera.

Izraz za izračunavanje toplinskog koji se izmjenjuje s materijom:

$$\Phi = A \cdot \frac{\lambda}{\rho} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (4.6)$$

gdje su:  $A$  površina preko koje se odvija toplinski tok,  $\lambda$  koeficijent vodljivosti topline,  $\rho$  gustoća materije.

Promjena temperature stijenke kalupne šupljine pri završetku ubrizgavanja polimera:

- toplinska prodornost materijala kalupa  $b_k = 10238 \text{ W s}^{1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
- toplinska prodornost PP s 30% staklenih vlakana  $b_p = 651 \text{ W s}^{1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

$$T_p = \frac{T_k \cdot (b_k + b_p) - (1 - A) \cdot T_t \cdot b_p}{b_k + b_p \cdot A} \quad (4.7)$$

gdje je:  $T_p$  početna temperatura ciklusa injekcijskog prešanja.

$$T_p = \frac{343 \cdot (10238 + 651) - (1 - 0,061898) \cdot 564 \cdot 651}{10238 + 651 \cdot 0,061898} = 329,8 \text{ K}$$

Dodirna temperatura je najviša temperatura koja se postiže na stijenci kalupne šupljine tijekom ciklusa injekcijskog prešanja.

$$T_D = \frac{b_k \cdot T_p + b_p \cdot T_t}{b_k + b_p} \quad (4.8)$$

gdje je:  $T_D$  dodirna temperatura.

$$T_D = \frac{10238 \cdot 329,8 + 651 \cdot 564}{10238 + 651} = 343,8 \text{ K}$$

Toplinski tok koji daje čelik kalupa:

$$\Phi_c = 0,061898 \cdot \frac{\lambda}{\rho} \cdot (0) = 0 \text{ W}$$

Jer su razlike u temperaturi čelika na početku i kraju procesa zanemarive.

Toplinski tok vode:

$$\Phi_v = 0,061898 \cdot \frac{0,64}{1000} \cdot (40 - 162) = -0,004833 \text{ kW}$$

Koeficijent vodljivosti topline za polipropilen s 30 % staklenih vlakana:

$$\lambda_p = a_{ef} \cdot \rho \cdot c \quad (4.9)$$

gdje su:  $\lambda_p$  koeficijent vodljivosti topline za polipropilen s 30 % staklenih vlakana,  $c$  toplinski kapacitet polipropilena.

$$\lambda_p = 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1140 \cdot 1,59 \cdot 10^3 = 0,1124 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Toplinski tok polipropilena s 30% staklenih vlakana:

$$\Phi = 0,061898 \cdot \frac{0,1124}{1140} \cdot (290 - 162) = 0,000781174 \text{ kW}$$

Ukupni toplinski tok:

$$\Phi_{uk} = \Phi_v + \Phi_c + \Phi_p = -0,004833 + 0 + 0,00078117 = -0,004052 \text{ kW}$$

Ukupni toplinski tok je negativan, što znači da bi trebalo dovesti energiju vodi da se zagrije do temperature postojanosti oblika. Voda koja je ubrizgana pod tlakom 10 bar i temperaturom od 40 °C će preuzeti toplinu od polimera. Vrijeme koje je potrebno da se ova toplina izmjeni odgovara vremenu potrebnom da se postigne temperatura postojanosti oblika.

Energija potrebna za grijanje polimera od 162 °C do 290 °C:

$$Q = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4.10)$$

gdje su:  $m_p$  masa polimera,  $c_p$  toplinski kapacitet polimernog materijala,  $\Delta T$  razlika temperatura ( $t_2 - t_1$ ).

$$Q = 0,3329 \cdot 1,59 \cdot 128 = 67,751 \text{ J}$$

Vrijeme postizanja temperature postojanosti oblika:

$$t_{po} = \frac{Q}{\Phi} \quad (4.11)$$

gdje je:  $t_{po}$  – vrijeme potrebno za postizanje temperature postojanosti oblika.

$$t_{po} = \frac{0,067751}{0,000781174} = 86,73 \text{ s}$$

Tijekom ovog vremena moguće je oblikovati unutrašnjost proizvoda. Poslije ovog vremena dostiže se temperatura postojanosti oblika i daljnje oblikovanje nije moguće.

#### 4.4.3. *Faza uklanjanja vode*

Faza uklanjanja vode iz šupljine u proizvodu je nužna zbog kasnijih dorada na proizvodu, a i zbog kasnijih transporta gotovih proizvoda. Proizvodi koji bi sadržavali vodu bili bi nezgodni za transport, jer bi sadržavali oko 0,4 litre vode koja više nije potrebna. Vodu treba gravitacijskim putem ukloniti iz kalupne šupljine.

#### 4.4.4. *Faza pečaćenja uljevnog sustava*

Poslije uklanjanja vode iz šupljine potrebno je zatvoriti evakuacijski kanal. Proizvod mora kasnije biti potpuno vodonepropustan, pa pečaćenje treba biti kvalitetno. Pečaćenje se vrši poslije sušenja unutrašnje šupljine crijepa kolektora. Budući da je vruća mlaznica i dalje priključena na uljevni sustav proizvoda i da postoje kanali po kojima je tekla voda iz šupljine, pečaćenje je moguće izvršiti naknadnim kratkim ubrizgavanjem polimernog materijala. Na ovaj način je ušće potpuno zapečaćeno i vodonepropusno.

#### 4.4.5. *Faza vađenja otpreska iz kalupne šupljine*<sup>9</sup>

Završna faza injekcijskog prešanja je vađenje otpreska iz kalupne šupljine. Vađenje je potrebno provesti bez oštećenja otpreska. Na vađenje otpreska iz kalupne šupljine imaju utjecaja:

- kut nagiba stijenki
- završna obradba stijenki
- estetski zahtjevi
- nazočnost provrta i podreza.

Površine otpreska u pretpostavljenom smjeru otvaranja kalupa moraju se oblikovati s skošenjima, kako bi se omogućilo olakšano i pouzdano vađenje otpreska iz kalupne šupljine bez oštećivanja.

Skošenja stijenki otpreska smanjuju utjecaj podreza, te olakšavaju prodor zraka između otpreska i žiga (umanjuje se utjecaj vakuuma). Također uvelike smanjuju silu potrebnu za vađenje otpreska.

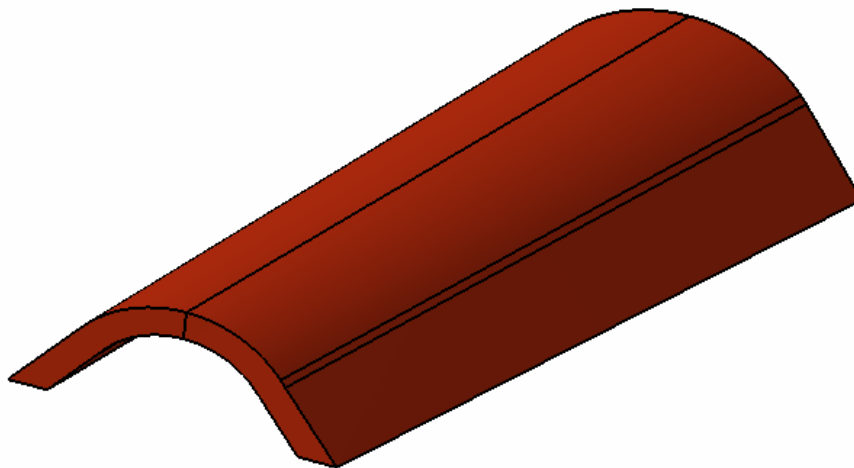
Potrebni nagibi stijenki ovise o:

- visini otpreska (izmjere u smjeru otvaranja kalupa)
- modulu elastičnosti kalupa
- kvaliteti površina stijenki kalupne šupljine
- stezanju (skupljanju otpreska)
- predviđenom sustavu za vađenje otpreska.

Općenito se za plastomere preporučuje kut nagiba oko  $1^\circ$ . Kod manjih otpresaka kut nagiba iznosi oko  $0,5^\circ$ , a kod otpresaka velikih površina u smjeru otvaranja kalupa 2 do  $3^\circ$ . Za duromerne otpreske kut nagiba iznosi 1 do  $3^\circ$ . Utjecaj završne obradbe stijenki kalupne šupljine na silu vađenja otpreska, također nije zanemariv. Poželjno je predvidjeti smjer poliranja stijenki kalupne šupljine u smjeru otvaranja kalupa, tj vađenja otpreska. Elementi sustava za vađenje otpreska uglavnom ostavljaju vidljive tragove na otprescima. Moraju se definirati mjesta na otpresku koja nisu pogodna kao mjesta za vađenje iz estetskih razloga. Položaj otisaka elemenata sustava za vađenje otpreska treba smjestiti tako da su otisci što manje vidljivi tijekom upotrebe otpreska.

#### **4.5. Konačni oblik proizvoda**

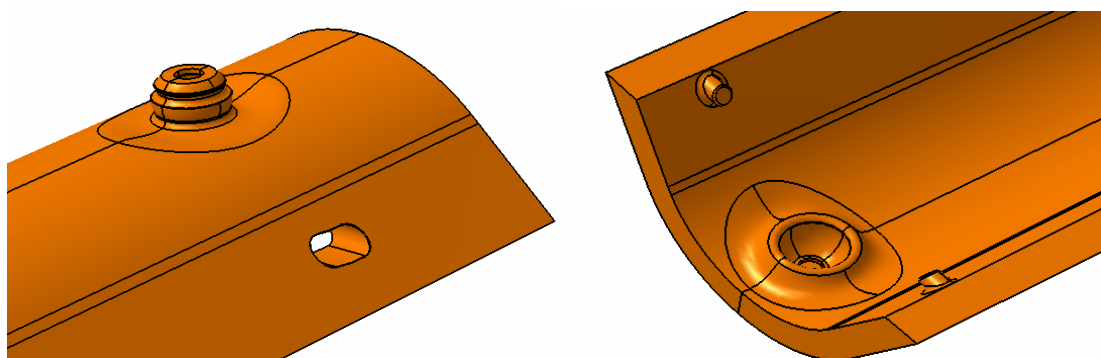
Crijep će se postavljati na krov u kombinaciji s glinenim crijepovima drugih proizvođača. Dio krova će se pokrivati glinenim crijepom, a željeni dio s crijepom kolektorom. Iz ovog proizlazi zahtjev na oblik i dimenzije crijepa kolektora, koje ne smiju puno odstupati od dimenzija i oblika glinenog crijepa. Za izradu diplomskog rada odabran je crijep prikazan na slici 4.4.



Slika 4.4. Oblik glinenog crijepa

Prikazani crijep je dugačak 350 mm i visok 60 mm. Crijep kolektor se mora moći ugraditi na isti način kao i glineni crijep. To znači da mora imati iste vrijednosti dimenzija dužine i visine. Uz to mora imati kanal kroz koji će strujati voda i dva priključka za ulaz i izlaz vode. Spojevi crijepova kolektora ne smiju utjecati na ukupnu visinu crijepova u spoju, istovremeno se mora osigurati brtvljenje spojeva. Crijep će pod utjecajima topline i tlaka biti izložen deformacijama. Iz tog razloga spojevi moraju osigurati dimenzijsku prilagodljivost sklopa.

Rješenje ovih zahtjeva su kuglasti zglobovi koji su ukopani ispod gornje i donje površine crijepa. Kuglasti zglobovi djelomično osiguravaju dimenzijsku prilagodljivost i prilagodljivost kuta ugradnje, a dobro osiguravaju brtvljenje spojeva. Crijep kolektor s kuglastim zglobovima za ugradnju prikazan je na slici 4.5.

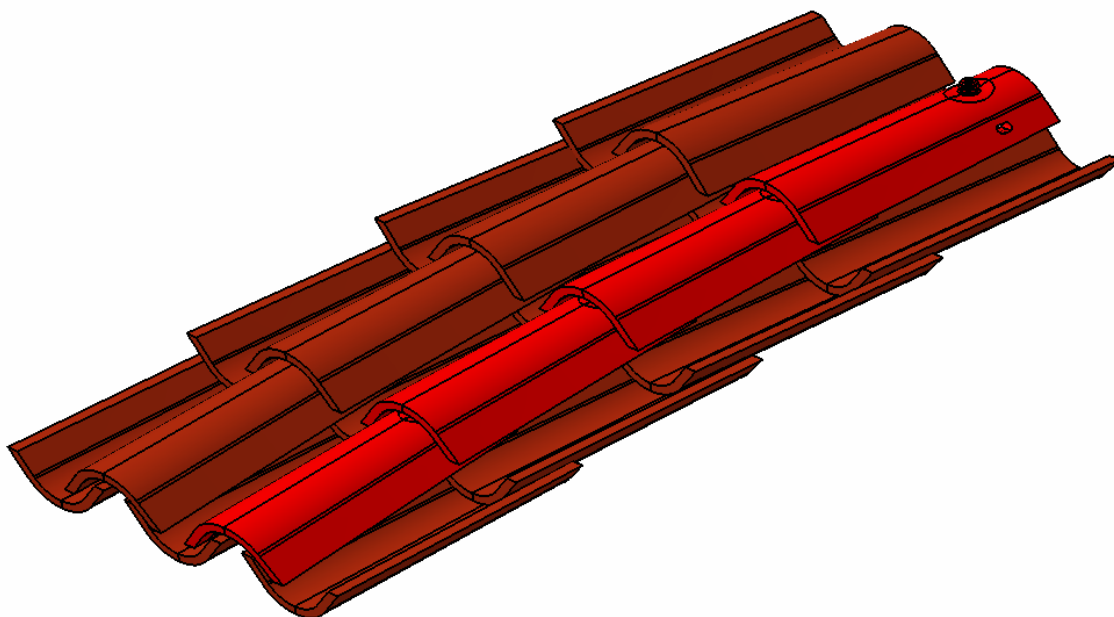


Slika 4.5. Izgled kuglastih zglobova za dovod i odvod vode na polimernom crijepu



Dodatni element koji osigurava brtvljenje spoja je gumena brtva koja se ugrađuje u utor na montažnom zglobu. Tijekom upotrebe će se gumena brtva istrošiti, pa ju je potrebno mijenjati. Spoj crijevova se mora rastaviti, ukloniti stara brtva i staviti nova. Kuglasti zglobovi omogućavaju jednostavnu montažu spoja s brtvom. Prilikom montaže, crijep treba pritiskati sve dok se ne osjeti da je zglob „preskočio“. Ovom funkcijom osigurava se osjetilna potvrda kvalitete spoja pri montaži. Za dodatno ukrućenje crijevova pri spajanju postoje dva zupca i pripadajući utori. Zupci i utori su prikazani na slici 4.5. Zupci su okrugli, a utori su ovalnog oblika. Ovalni oblik utora omogućava prihvrat zubaca pri različitim kutovima ugradnje, a istovremeno dozvoljavaju kompenzacije produljenja uzrokovanih djelovanjem tlaka i temperature.

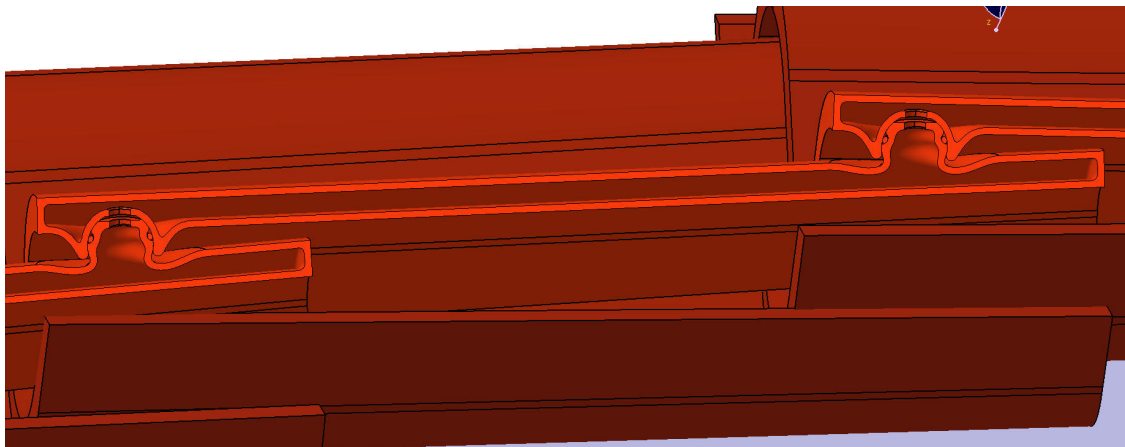
Ovako ostvaren spoj crijevova kolektora prikazan je na slici 4.6. Na modelu detalja krova složen je jedan red crijeva kolektora. Kako je vidljivo crijep kolektor u sklopu izgleda identično kao pravi crijep. Svi prije opisani elementi koji služe za međusobni prihvat crijevova su skriveni jer se nalaze ispod crijeva. Odabirom boje glinenog crijeva za crijep kolektor i matiranom površinom crijeva moguće je dobiti proizvod kojeg se na krovu neće moći razlikovati od glinenog crijeva.



Slika 4.6. Detalj sklopa pokrova

Prije početka konstruiranja kalupa potrebno je provjeriti kako se dimenzijski uklapaju kuglasti zglobovi za ugradnju i da li se uklapaju zupci i utori. Naknadne prepravke na kalupu bile bi

skupe, pa je potrebno nekom metodom provjeriti te dimenzije i oblike. Prvi način provjere se odnosi na različite presječne poglede u programskom paketu CATIA. Slika 4.7 prikazuje pogled na ravnini koja presijeca oba kuglasta zgloba crijepova u sklopu.



Slika 4.7. Detalj presjeka crijepova u sklopu

Dodatno u programu CATIA je moguće izvršiti analizu naprezanja uslijed djelovanja tlaka vode i temperature. Moguće je predvidjeti iznose naprezanja i deformacija.

Drugi način provjere se odnosi na izradbu umanjenog fizičkog modela na kojem će se ispitati funkcionalnost zglobova. Postupak izradbe fizičkog modela se naziva brza izradba prototipova (e. *Rapid Prototyping*). Funkcionalnost zglobova koja će se ispitati na ovom modelu odnosi se na brtvljenje spojeva i na klik koji se mora čuti i osjetiti prilikom ugradnje. Stvarni model će se moći podvrgnuti utjecajima tlaka vode i temperature do nekih granica. Ovaj pokus će dati informacije o ponašanju crijepova u sklopu u stvarnim uvjetima kojima će biti podloženi pri radu. Metodama provjere treba ispitati ponašanje modela u primjeni i ukloniti slabe točke.

## **5. SIMULACIJA NAPREZANJA I DEFORMACIJA MODELA CRIJEPA I ANALIZA REZULTATA**

Crijep će u primjeni biti podvrgnut utjecajima sunca i tlaka vode. Ljeti je sunce jako i temperatura krova je visoka, dok je zimi temperatura na krovu niska. Iz ovog razloga potrebno je odrediti, barem okvirno, deformacije i naprezanja u modelu uslijed djelovanja temperature i tlaka. Iznosi ovih deformacija i naprezanja su bitni kod konstruiranja modela, jer se pravovremeno mogu ukloniti slabe točke modela. Kasniji prepravci na gotovom kalupu su skupi ili u nekim slučajevima nemogući. Simulacijom temperature okoliša i tlaka vode odredit će se i granični parametri primjene crijeva. Crijep ne smije biti podvrgnut visokim tlakovima i visokoj temperaturi zbog materijala iz kojeg je napravljen. Previsoki parametri u primjeni mogli bi promijeniti oblik crijeva ili ga uništiti.

### **5.1. Izbor materijala proizvoda**

Za provedbu simulacije naprezanja i deformacija potrebno je definirati materijal od kojeg će se crijeva načiniti. Svaki materijal ima svoja fizikalna svojstva, pa bi pogrešne vrijednosti parametara dale pogrešnu sliku naprezanja i iznosa deformacija proizvoda. Izbor materijala je najbolje započeti razmatranjem svojstava na koja se ne može utjecati oblikovanjem proizvoda. Takva svojstva su toplinska rastezljivost, temperatura postojanosti oblika, gustoća i mnoga druga svojstva. Kod izbora materijala mora se voditi računa i o nabavnoj cijeni materijala. Neki materijali imaju visoku temperaturu postojanosti oblika i to ih čini idealnima za ovaj proizvod, ali su cijenom po kilogramu materijala preskupi. Rješenje treba tražiti u jeftinijim materijalima u koje su dodana punila za poboljšanje svojstava.

U teorijskom dijelu ovoga rada, prilikom navoda istraživanja provedenih na temu postupka injekcijskog prešanja s pomoću vode, često se spominjao polipropilen s 30 % staklenih vlakana. Iskustva dobivena u istraživačkim radovima primijenit će se i u diplomskom radu. Za materijal proizvoda je odabran polipropilen s 30 % staklenih vlakana. Na internetu postoje baze svojstava polimernih materijala. Iz tih baza odabrana su dva materijala tvrtke Borealis: RA130E-2491

(polipropilen) i GB311U (polipropilen s 30 % staklenih vlakana). U tablici 5.1 dane su vrijednosti istih svojstava za ta dva materijala.

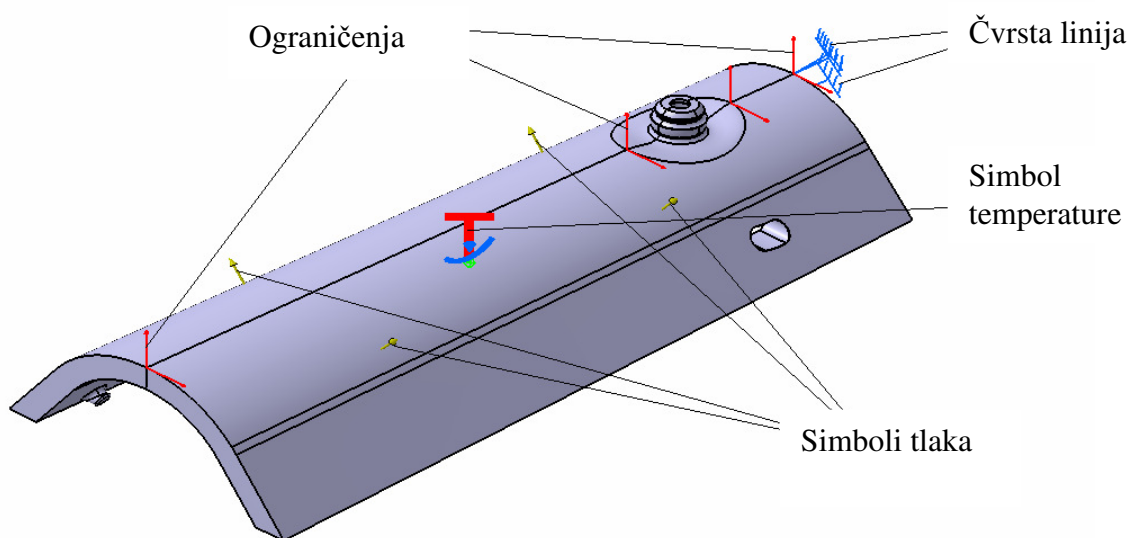
Tablica 5.1. Svojstva materijala (Borealis) <sup>10</sup>

| Svojstvo  | Jedinica          | RA130E-2491          | GB311U                |
|---|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Gustoća   | Kg/m <sup>3</sup> | 905                  | 1140                  |
| Maseni protok taljevine                               | g/10min           | 0,3                  | 2                     |
| Koeficijent toplinske difuzivnosti                    | W/(mK)            | 0,24                 | 0,12                  |
| Koeficijent toplinskog širenja [0-70°C]               | K <sup>-1</sup>   | 1,5·10 <sup>-4</sup> | 0,96·10 <sup>-4</sup> |
| Donja granica razvlačenja                             | MPa               | 25                   | 97                    |
| Produljenje pri razvlačenju                           | %                 | 13,5                 | 2,80                  |
| Modul rastezljivosti                                  | MPa               | 900                  | 6 200                 |
| Modul savitljivosti                                   | MPa               | 800                  | 6 800                 |
| Charpiev test, bez zareza [23 °C]                     | kJ/m <sup>2</sup> | Ne lomi se           | 50                    |
| Charpiev test, s zarezom, niska temperatura [-20 °C]  | kJ/m <sup>2</sup> | 40                   | 9                     |
| Charpiev test, bez zareza, niska temperatura [-20 °C] | kJ/m <sup>2</sup> | 2                    | 45                    |
| Charpiev test, s zarezom [23 °C]                      | kJ/m <sup>2</sup> | 20                   | 11                    |
| Temperatura postojanosti oblika na 0,46 MPa           | °C                | 147                  | 162                   |
| Temperatura postojanosti oblika na 1,8 MPa            | °C                | 135                  | 152                   |
| Skupljanje  | %                 | 1,5-2                | 0,8                   |
| Temperatura polimerne taljevine                       | °C                | 210-220              | 230-280               |

Kako je prikazano u tablici 5.1, polipropilen s 30 % staklenih vlakana ima veći modul savitljivosti i modul rastezljivosti, a manji postotak skupljanja. Posjeduje i višu temperaturu postojanosti pri 1,8 MPa.

## 5.2. Simulacija naprezanja i deformacija crijeva u programskom paketu CATIA

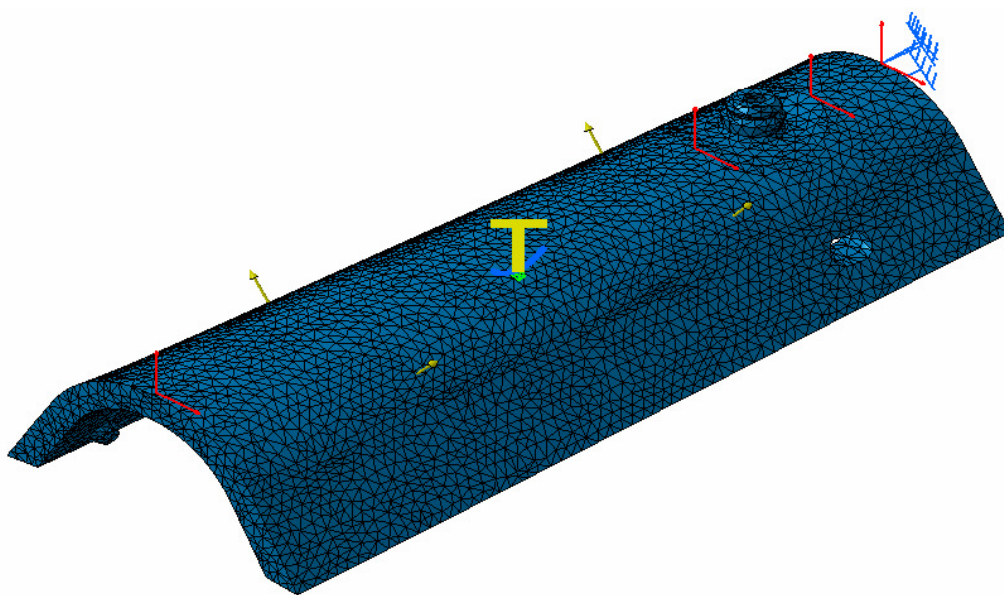
Simulacija tlaka vode i temperature je napravljena u programu CATIA, sa svojstvima materijala koja su navedena za polipropilen s 30 % staklenih vlakana. Zbog pojednostavljenja simulacije nužno je uvesti pojednostavljenja u smislu djelovanja tlaka i rasporeda temperature na presjecima modela. Tlak vode djeluje na nutrašnjoj stijenci šupljine i pokušava je razvući u smjeru normale na djeliću površine. Zanimareni su utjecaji vrtloženja vode na ulazu i izlazu iz crijeva. Temperaturni utjecaj je jednak na svim presjecima crijeva. Zanimarene su moguće temperaturne razlike između gornjeg i donjeg kraja crijeva zbog strujanja toplije vode na izlaznom priključku i hladnije vode na ulaznom priključku. Za simulaciju je potrebno odrediti čvrstu površinu, jer program mora imati referencu od koje će računati pomake. Slika 5.1 prikazuje odabranu čvrstu površinu na modelu i simbole tlaka i temperature.



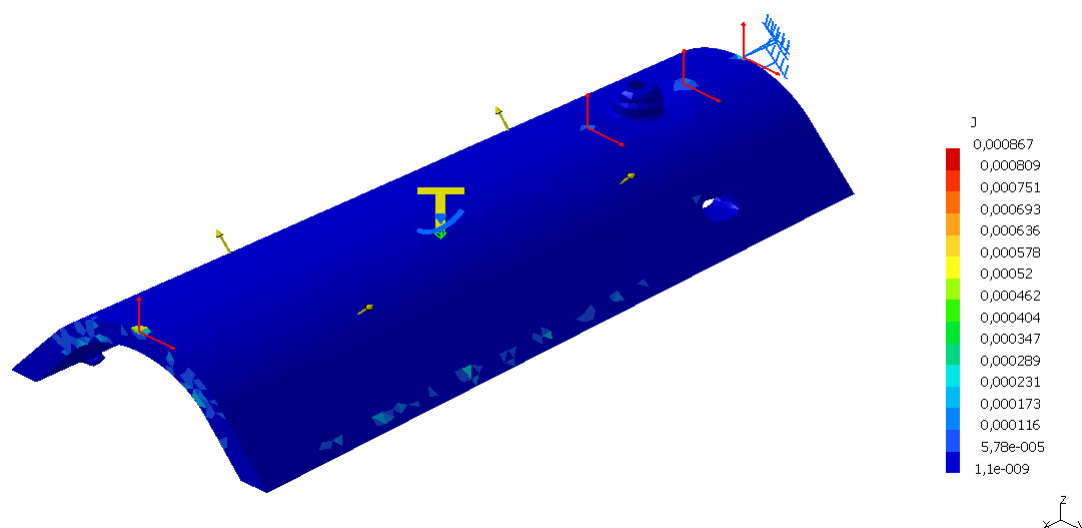
Slika 5.1. Prikaz modela prije simulacije

Na čvrstoj površini nije moguće točno odrediti iznos deformacija i naprezanja jer je program smatra referencom koja uvijek ostaje nepromijenjena. Područje koje je blizu čvrste površine isto tako može imati pogrešne iznose naprezanja i deformacija, pa vrijednosti treba uzeti s rezervom.

Kod metode konačnih elemenata je bitna veličina elementa. Čim je veličina manja, simulacija je točnija i traje dulje. Na slici 5.2 prikazan je model kojem je dodijeljena veličina elementa od 5 mm. Ova veličina je dovoljna za veliku preciznost simulacije.



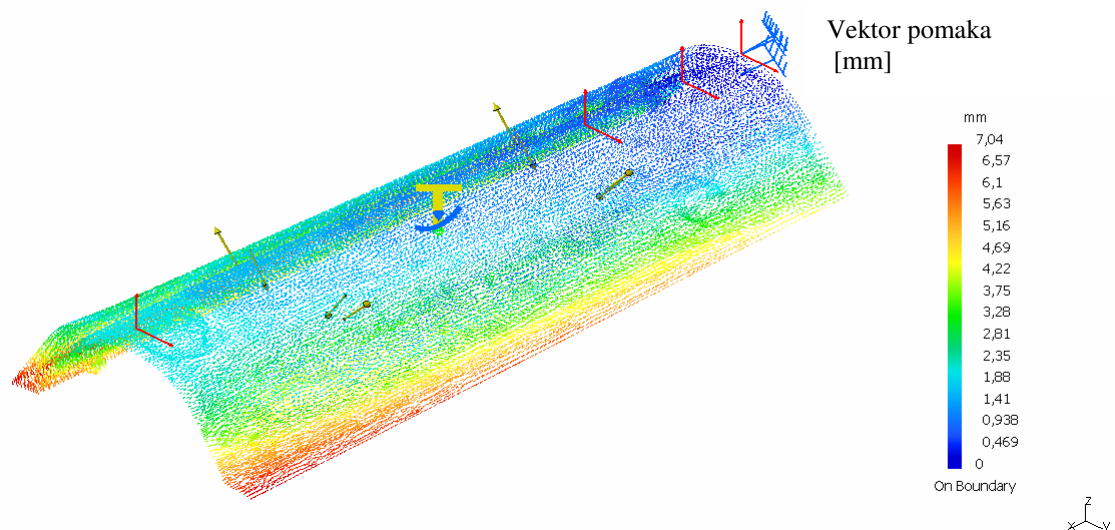
Slika 5.2. Model s mrežom konačnih elemenata



Slika 5.3. Lokalna greška J

Slika 5.3 prikazuje lokalnu grešku J koji program sam preračunava. Slika faktora procijenjene lokalne greške služi za prikazivanje polja grešaka koje nastaju pri računanju. Ona označavaju skalarna polja raspodjele greške u izračunu energije za zadane uvjete. Program procjenjuje vjerodostojnost proračuna i pruža globalnu sliku te vjerodostojnosti. Također prikazuje i legendu, koja daje kvantitativni uvid u raspodjelu duž modela. Na modelu je prikazana mreža konačnih elemenata i u njoj je bojama označena lokalna greška.<sup>11</sup>

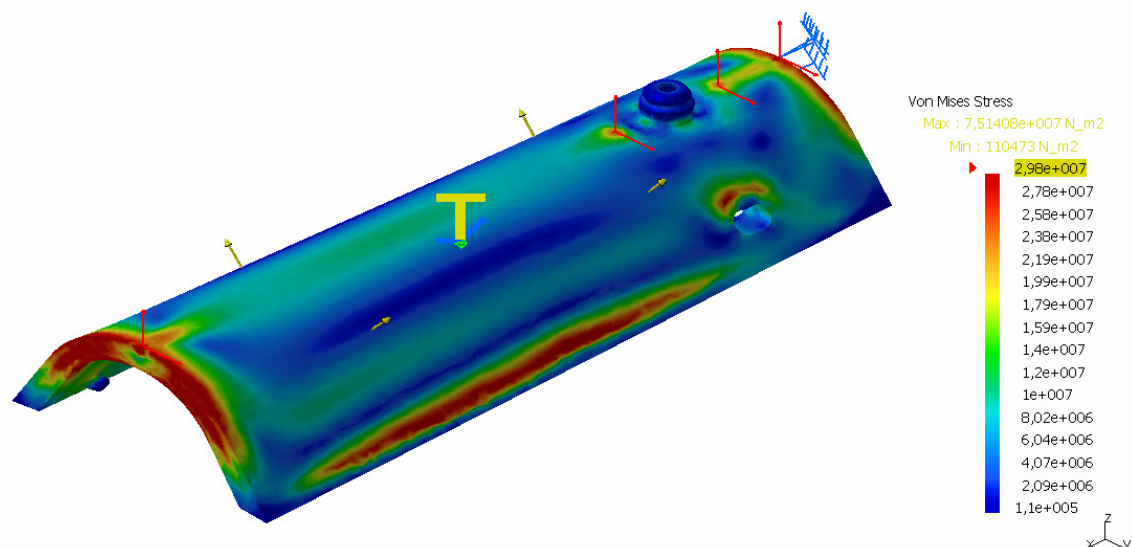
Kako prikazuje legenda većina modela je obojana u tamno plavu boju što znači da je lokalna greška manja ili jednaka  $1,1 \cdot 10^{-9}$ . Maksimalni iznos lokalne greške je  $0,000867$ .



Slika 5.4. Prikaz vektora pomaka

Slika 5.4 prikazuje izračunate vektore pomaka za zadanu temperaturu i tlak. Crijep je za potrebe simulacije podvrgnut temperaturi okoline od 80 °C i tlaku vode od 1 bar. Vektori pomaka su prikazani strelicama, koje određuju smjer i bojama koje označavaju iznos pomaka. U legendi sa strane moguće je prema bojama okvirno odrediti iznos pomaka. Krična područja se nalaze na lijevoj strani crijepa, označena crvenom bojom, što odgovara iznosu pomaka od 6,57 do 7,04 mm.





Slika 5.5. Prikaz naprezanja na crijepu

Slika 5.5 prikazuje raspodjelu naprezanja na crijepu, kada je on podvrgnut tlaku vode od 1 bar i temperaturi okoliša od 80 °C. Maksimalno naprezanje dobiveno ovom simulacijom iznosi  $7,51408 \cdot 10^7 \text{ N/mm}^2$ . Maksimalno dozvoljeno naprezanje za polipropilen s 30 % staklenih vlakana je  $25 \cdot 10^9 \text{ N/mm}^2$ . Budući da je maksimalno dozvoljeno naprezanje veće od stvarnog, konstrukciju crijepa nije potrebno mijenjati ili pojačavati rebrima. Crvena područja na slici prikazuju mjesta najvećeg naprezanja, a ono prema legendi sa strane iznosi  $2,98 \cdot 10^7 \text{ N/mm}^2$ , može se zaključiti da proizvod nije podvrgnut opasnim naprezanjima.

### **5.3. Zaključak o simulaciji naprezanja i deformacija proizvoda u programskom paketu CATIA**

Simulacijom je dobivena okvirna slika naprezanja i deformacija crijepa prilikom djelovanja temperature i tlaka. Primijećeno je da veći utjecaj na deformacije i naprezanja ima tlak vode, dok temperatura nema skoro nikakav utjecaj. Ipak budući da će crijep biti u upotrebi podvrgnut utjecajima i temperature i tlaka vode, nužno ih je promatrati zajedno. Ustanovljeni su smjerovi deformacija proizvoda kada se podvrgne djelovanju temperature i tlaka. Deformacije djeluju prema centru polumjera lukova koji tvore prednji profil, tjerajući ga da se skuplja. Ova pojava je povoljna jer se unutar toga profila, kada se crijep složi, nalazi drugi crijep koji je osiguran kukama i utorima. Pritiskanje izazvano deformacijama donji crijep pritišće i ne dopušta mu pomake. Iz slike 5.4 vidljivo je da priključak na početku crijepa ima najmanje iznose deformacija, što znači da će se donji crijep odupirati pritiskanju kraja gornjeg crijepa. Ovime je crijep osiguran protiv vitoperenja pri temperaturi od 80 °C i tlaku vode od 1 bar.

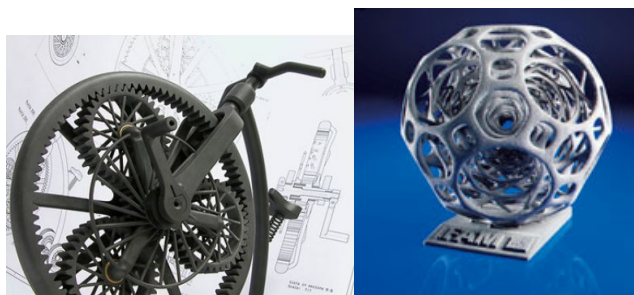
Naprezanja na crijepu su prikazana na slici 5.5. Sa strane u legendi je vidljiv maksimalni iznos naprezanja koji iznosi 29,8 MPa. Maksimalno dopušteno naprezanje za polipropilen s 30 % staklenih vlakana iznosi 62 MPa. Dopušteno naprezanje je 2 puta veće nego maksimalno naprezanje koje se javlja. Ova razlika daje rezervu u primjeni. Crijep će se moći podvrgnuti višim parametrima temperature i tlaka vode, a da ne dođe do pucanja ili trajnih deformacija.

Konstrukcija crijepa, prema provedenoj simulaciji, zadovoljava sve zahtjeve vezane za iznose naprezanja i deformacija koje su posljedica djelovanja tlaka i temperature vode. Crijep nije potrebno prepravljati. Jedini prepravci se mogu odnositi na tehnološke zahvate koje je potrebno načiniti zbog prirode postupka injekcijskog prešanja s pomoću vode.

## 6. BRZA IZRADBA PROTOTIPOVA

### 6.1. Kratki uvod u postupak<sup>12</sup>

Razvoj proizvoda u današnjoj industriji traje sve kraće. Zbog povećanja konkurentnosti na tržištu, vrijeme koje prođe od ideje do konačnog proizvoda dobivenog nekim od postupaka injekcijskog prešanja je sve kraće. Prilikom razvoja proizvoda koriste se novi postupci dobivanja prototipnih proizvoda, a postupak se zove brza izradba prototipova. Brza izradba prototipova se koristi i kod ispitivanja funkcijskih značajki proizvoda kao što je oblik površine, mogućnost sklapanja s drugim dijelovima u sklop, kao i kod proizvodnje dijelova za prototipne strojeve. Slika 6.1 prikazuje primjere postupka brze izradbe prototipova.



Slika 6.1. Primjeri prototipnih tvorevina<sup>13</sup>

Brza izradba prototipova je automatska konstrukcija fizičkih objekta pomoću proizvodnje slobodnih formi. Prvi komercijalni strojevi za brzu izradbu prototipova postali su dostupni oko 1990 godine i koristili su za proizvodnju modela i prototipnih dijelova. Danas se postupak koristi za puno širi spektar primjena, pa čak i za proizvodnju manjih serija proizvoda. Neki umjetnici koriste postupak za izradbu kompliciranih oblika za izložbe. Noviji modeli uređaja za brzu izradbu prototipova omogućuju izradbu čak modela i sklopova u više boja. Zbog preciznosti strojeva, dobiveni sklopovi posjeduju potpunu funkcionalnost. Moguće je izraditi i proizvode s geometrijom koju nije moguće dobiti nikakvim drugim postupkom, kao npr. unutarnji kanali za podmazivanje i hlađenje. Postupak brze izradbe prototipova uzima oblik iz CAD programa ili bilo kojeg drugog programa za animiranje i pretvara ih u tanke, horizontalne presjeke. Svaki taj presjek se stvara u fizičkom prostoru, sve dok se cijeli model ne izradi. Virtualni model i onaj fizički su gotovo identični.

Prednosti postupka su:

- Smanjenje vremena razvoja
- Povećava se fleksibilnost i konkurentnost malih serija
- Proizvodi mogu imati bilo kakav stupanj geometrijske kompleksnosti
- Mogućnost izradbe dijelova iz različitih materijala i boja
- Ne mora se raditi kalup
- Mogu se dobiti slobodne forme na brz i relativno jeftin način.

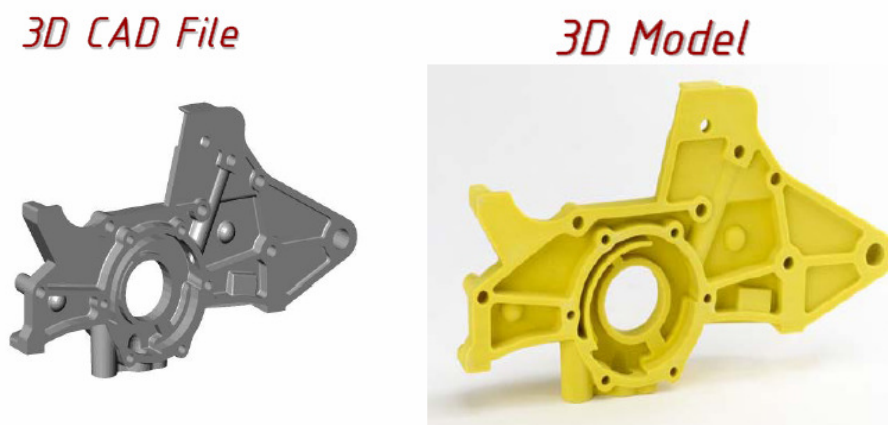
Mane postupka su:

- Relativno visoka cijena sustava
- Ograničena upotreba materijala
- Naknadna obradba
- Visoka cijena troškova održavanja

## 6.2. Opis načina rada stroja za brzu izradbu prototipova Objet-Eden 330

S aditivnom funkcijom, stroj čita podatke iz CAD modela i slaže slojeve kapljevine, koja se zatim očvrstne pomoću zračenja UV lampe. Na ovaj način stroj stvara proizvod od niza poprečnih presjeka. Ovi presjeci, koji odgovaraju virtualnim presjecima u CAD modelu, sraščuju jedan na drugom čineći tako konačni oblik. Prednost ovog postupka je mogućnost izradbe bilo kojeg oblika.<sup>13</sup>

Standardna poveznica između CAD programa i stroja je STL datoteka. STL aproksimira oblik dijela ili sklopa pomoću trokutastih djelića. Mali djelići stvaraju bolju kvalitetu površine. Slika 6.2 prikazuje primjer proizvoda u 3D CAD datoteci i u fizičkom 3D modelu dobivenog postupkom brze izradbe prototipa.<sup>13</sup>



Slika 6.2. Primjer djela dobivenog brzom izradbom prototipova<sup>13</sup>

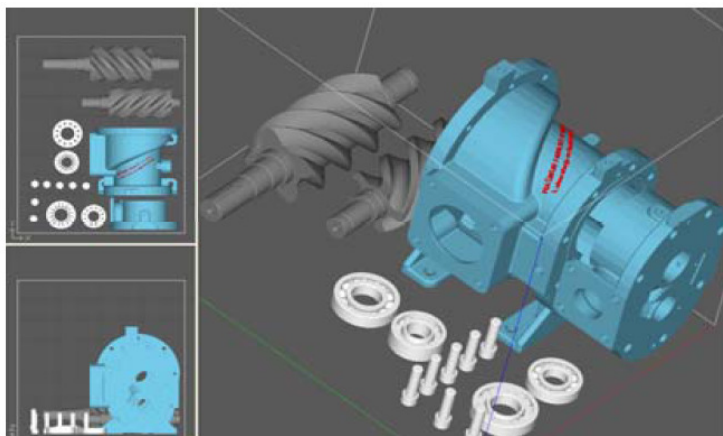
Riječ „rapid“ u engleskom nazivu postupka „Rapid prototyping“ (e. rapid = brzo) je relativna: izradba modela s dostupnim metodama može trajati nekoliko sati, pa čak i nekoliko dana, ovisno o postupku koji se koristi i veličini i kompleksnosti modela. Aditivni sustavi za brzu izradbu prototipova mogu modele proizvesti za nekoliko sati, iako to može varirati ovisno o vrsti stroja koji se koristi i o veličini i broju modela koji se istovremeno izrađuju.<sup>12</sup>

Object-Eden 330 se temelji na „Polyjet“ postupku. Ovaj postupak izradbe slobodnih formi koristi dva materijala pri izradbi dijelova. Prvi materijal je glavni materijal, a drugi je potporni materijal

(podupire viseće dijelove tokom izradbe). Potporni materijal se kasnije uklanja pomoću visoke temperature ili se topi pomoću otapala ili u vodi.<sup>12</sup>

Postupak injekcijskog prešanja je jeftiniji za izradbu plastičnih dijelova u velikim serijama, postupak brze izradbe proizvoda je brži i jeftiniji kada se proizvode male serije proizvoda.<sup>12</sup>

Model proizvoda se najprije mora napraviti na računalu u programima za izradbu 3D modela, kao što su SolidWorks, CATIA ili u bilo kojem drugom programu. Poslije se model mora spremiti kao .stl datoteka koju program stroja može pročitati. Stroj za izradbu prototipa, Eden 330, gradi model u slojevima debljine 0,016 mm, sve dok ne postigne ukupnu visinu. Stroj koristi dvije vrste materijala, potporni i gradivni. Potporni materijal služi kao potpora glavnom tijelu kada se rade kosine ili drugi oblici koji se ne mogu držati sami za sebe bez oslonca. Potporni materijal se mora prilikom završetka izradbe isprati vodom s proizvoda. Glavni materijal služi za dobivanje čvrstog tijela proizvoda. Ovaj materijal se nanosi u slojevima koji otvrdnjavaju pod utjecajem UV lampe. Utrošak materijala, preciznost i položaj prototipova određuje se u programu za upravljanje strojem. Slika 6.3 prikazuje prozor programa koji raspoređuje proizvode po radnom području stroja.<sup>13</sup>



Slika 6.3. Prozor programa za brzu izradbu prototipova<sup>13</sup>

## 7. PRORAČUN CIJENE KOŠTANJA OTPRESKA

### 7.1. Osnovni podaci

Polimerni materijal otpreska polipropilen s 30 % staklenih vlakana, proizvođač Borealis:

- specifična gustoća:  $\rho_p = 1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- jedinična cijena osnovnog materijala:  $C_{om} = 12,5 \frac{\text{kn}}{\text{kg}}$

Obujam proizvodnje:

- ukupna količina otpresaka  $n_{uk} = 1\,000\,000 \text{ kom}$
- veličina serije  $n_p = 10\,000 \text{ kom}$

Ubrizgavalica:

- cijena radnog sata ubrizgavalice  $C_u = 55 \frac{\text{kn}}{\text{h}}$
- cijena radnog sata radnika  $C_{ra} = 25 \frac{\text{kn}}{\text{h}}$

Podaci o otpresku:

- masa otpreska  $m_o = 409 \text{ g}$
- masa uljevnog sustava  $m_{us} = 0 \text{ g}$

Podaci o kalupu:

- broj kalupnih šupljina  $x_k = 1$

Troškovi prototipne serije:

- planirani broj prototipnih serija  $n_{ps} = 3$
- veličina prototipne serije  $n_{serPS} = 100 \text{ kom}$
- broj radnika  $n_r = 1$
- pripremno završno vrijeme  $t_{pz} = 3 \text{ h}$
- organizacijski gubici prototipne serije  $G_{or} = 1,5 \text{ h}$
- predviđeni troškovi obradbe  $C_{osTO} = 1\,500 \text{ kn}$
- pouzdanost postupka  $\mu_p = 86 \%$

Troškovi probne (nulte) serije:

|   |   |
|---|---|
| - veličina probne serije                      | $n_{\text{serPRS}} = 10\,000 \text{ kom}$ |
| - broj radnika                                | $n_r = 1$                                 |
| - predvidivi dio škarta                       | $S_u = 10 \%$                             |
| - udio škarta za ponovnu preradbu             | $S_{\text{up}} = 0,5 \%$                  |
| - pouzdanost postupka                         | $\mu_p = 86 \%$                           |
| - pripremno završno vrijeme                   | $t_{\text{pz}} = 2 \text{ h}$             |
| - organizacijski gubici probne (nulte) serije | $G_{\text{or}} = 1,5 \text{ h}$           |

Troškovi proizvodnje:

|                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| - broj radnika                    | $n_r = 1$                       |
| - predvidivi udio škarta          | $S_u = 6 \%$                    |
| - udio škarta za ponovnu preradbu | $S_{\text{up}} = 0,5 \%$        |
| - pouzdanost postupka             | $\mu_p = 86 \%$                 |
| - pripremno završno vrijeme       | $t_{\text{pz}} = 1,5 \text{ h}$ |
| - organizacijski gubici serije    | $G_{\text{or}} = 1 \text{ h}$   |

Troškovi održavanja:

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| - troškovi održavanja kalupa za seriju | $T_{\text{0ser}} = 4\,000 \text{ kn}$ |
|--|---------------------------------------|

## 7.2. Troškovi konstruiranja

Ukupni troškovi konstruiranja:

- broj radnih sati za pojedinu fazu konstruiranja  $n_{\text{rk}}$ :
  - broj radnih sati konstruiranja kalupa = 90 h
  - broj radnih sati tehnološke razrade = 75 h
- cijena radnog sata za pojedinu fazu konstruiranja  $C_{\text{rk}}$ :
  - cijena radnog sata konstruiranja = 200 Kn
  - cijena radnog sata tehnološke razrade = 180 Kn

$$T_{\text{KON}} = \left( \sum n_{\text{rk}} \cdot C_{\text{rk}} \right) \quad (7.1)$$

gdje je  $T_{\text{KON}}$  ukupni trošak konstruiranja.



$$T_{\text{KON}} = (90 \cdot 250 + 75 \cdot 180) = 36\,000 \text{ kn}$$

Troškovi konstruiranja po jednom otpresku:

$$C_{\text{KOT}} = \frac{T_{\text{KON}}}{n_{\text{uk}}} \quad (7.2)$$

gdje je  $C_{\text{KOT}}$  trošak konstruiranja po jednom otpresku.

$$C_{\text{KOT}} = \frac{36000}{1000000} = 0,036 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

### 7.3. Troškovi izradbe kalupa

Ukupna cijena osnovnog materijala nestandardnih elemenata kalupa:

Materijal nestandardnih dijelova kalupa čini čelik.

$$T_{\text{om}} = 6\,000 \text{ kn}$$

Ukupna cijena obradbe kalupa:

- plinsko odrezivanje = 2 h
- tokarenje = 15 h
- bušenje = 20 h
- grubo glodanje = 40 h
- glodanje (CNC) = 25 h
- toplinska obradba = 25 h
- plansko brušenje = 10 h
- kružno brušenje = 15 h
- erodiranje = 50 h
- poliranje = 8 h
- ručna obradba = 15 h
- montaža = 10 h

Prosječna cijena radnog sata obradbe  $C_{\text{iz}} = 200 \text{ kn}$

$$T_{\text{iz}} = \sum n_{\text{iz}} \cdot C_{\text{iz}} \quad (7.3)$$

gdje je  $T_{\text{iz}}$  ukupna cijena obradbe kalupa.

$$T_{\text{iz}} = 235 \cdot 200 = 47\,000 \text{ kn}$$

Ukupna cijena standardnih elemenata kalupa:

$$T_{sd} = 16\,000 \text{ kn}$$

Ostali troškovi izradbe kalupa:

$$T_{OS} = 5\,000 \text{ kn}$$

Ukupni troškovi izradbe kalupa:

$$T_{KA} = T_{om} + T_{iz} + T_{sd} + T_{OS} \quad (7.4)$$

gdje je  $T_{KA}$  ukupni trošak izradbe kalupa.

$$T_{KA} = 6000 + 47000 + 16000 + 5000 = 74\,000 \text{ kn}$$

#### 7.4. Troškovi prototipne serije

Ukupni trošak materijala za jednu prototipnu seriju:

$$C_{mKS} = C_{om} \cdot m_O \cdot n_{serPS} \quad (7.5)$$

gdje je  $C_{mKS}$  ukupni trošak materijala za jednu prototipnu seriju.

$$C_{mKS} = 12,5 \cdot 0,409 \cdot 100 = 511,25 \text{ kn}$$

Ukupni trošak ubrizgavalice za jednu prototipnu seriju:

$$C_{sO} = \left( \frac{t_c}{x_k \cdot \mu_p} + \frac{t_{pz} + G_{or}}{n_{serPS}} \right) \cdot C_u \quad (7.6)$$

gdje je  $C_{sO}$  cijena ubrizgavalice za jedan otpresak.

$$C_{sO} = \left( \frac{0,003}{1 \cdot 0,86} + \frac{3 + 1,5}{100} \right) \cdot 55 = 2,67 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

$$C_{sKS} = C_{sO} \cdot n_{serKS} \quad (7.7)$$

gdje je  $C_{sKS}$  ukupni trošak ubrizgavalice za jednu prototipnu seriju.

$$C_{sKS} = 2,67 \cdot 100 = 267 \text{ kn}$$

Ukupni trošak radne snage za jednu prototipnu seriju:

Troškovi radne snage ( $C_{rKS}$ ) se zbog male serije i kratkog vremena ciklusa zanemaruju.

Troškovi prototipne serije:

$$T_{KS} = n_{KS} \cdot (C_{mKS} + C_{sKS} + C_{rKS} + C_{osKS}) \quad (7.8)$$

gdje su:  $T_{KS}$  trošak prototipne serije,  $C_{osKS}$  predviđeni troškovi dorade za prototipnu seriju.

## 7.5. Troškovi probne (nulte) serije

Cijena materijala za probnu seriju:

- ukupna jedinična cijena materijala:

$$C_m = \frac{C_{om} + U_b \cdot C_b + U_r \cdot C_r}{1 + U_b + U_r} \quad (7.9)$$

gdje su:  $C_m$  ukupna jedinična cijena materijala,  $U_b$  udio boje,  $C_b$  jedinična cijena boje,  $U_r$  udio regenerata,  $C_r$  cijena regenerata.

$$C_m = \frac{12,5 + 0,1 \cdot 40 + 0 \cdot 0,2}{1 + 0,1 + 0} = 15 \text{ kn}$$

- stvarni jedinični utrošak materijala:

$$A_m = \frac{m_g - m_{us} \cdot S_{pp}}{x_k} \quad (7.10)$$

gdje su:  $A$  stvarni jedinični utrošak materijala,  $m_g$  masa grozda,  $m_{us}$  masa uljevnog sustava,  $S_{pp}$  udio uljevnog sustava koji se vraća u proizvodnju.

$$A_m = \frac{0,409 - 0 \cdot 0}{1} = 0,409 \text{ kg}$$

- stvarni jedinični gubici materijala zbog škarta:

$$B = m_o \cdot S_u \cdot (1 - S_{up}) \quad (7.11)$$

gdje je :  $B$  stvarni jedinični gubitci materijala zbog škarta,  $S_u$  predviđivi udio škarta,  $S_{up}$  udio škarta za ponovnu upotrebu.

$$B = 0,409 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0) = 0,057 \text{ kg}$$

- jedinični gubici nastali kod puštanja ubrizgavalice u rad i izmjene boje C:

Troškovi se zanemaruju zbog veličine serije i jednobojnog otpreska.

- cijena materijala za probnu seriju:

$$C_{mO} = C_m \cdot (A_m + B + C) \quad (7.12)$$

gdje je  $C_{mO}$  cijena materijala za jedan otpresak probne serije.

$$C_{mO} = 15 \cdot (0,409 + 0,057 + 0) = 6,99 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

$$C_{mPS} = C_{mO} \cdot n_{serPS} \quad (7.13)$$

gdje je  $C_{mPS}$  cijena materijala za probnu seriju.

$$C_{mPS} = 6,99 \cdot 100 = 699 \text{ kn}$$

Cijena ubrizgavalice za probnu seriju  $C_{sPS}$ :

$$C_{sO} = \left( \frac{t_c}{x_k \cdot \mu_p} + \frac{t_{pz} + G_{or}}{n_{serPS}} \right) \cdot C_u$$

$$C_{sO} = \left( \frac{0,003}{1 \cdot 0,86} + \frac{3 + 1,5}{100} \right) \cdot 55 = 2,67 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

$$C_{sPS} = C_{sO} \cdot n_{serPS} \quad (7.14)$$

gdje je  $C_{sPS}$  ukupni trošak ubrizgavalice za jednu probnu seriju.

$$C_{sPS} = 2,67 \cdot 100 = 267 \text{ kn}$$

Cijena rada za probnu seriju:

$$C_{rO} = \left( \frac{t_c}{x_k \cdot \mu_p} \right) \cdot C_{ra} \cdot n_r \quad (7.15)$$

gdje je  $C_{rO}$  trošak rada za jedan otpresak.

$$C_{rO} = \left( \frac{0,003}{1 \cdot 0,86} \right) \cdot 25 \cdot 1 = 0,087 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

$$C_{rPS} = C_{rO} \cdot n_{serPS} \quad (7.16)$$

gdje je  $C_{rPS}$  ukupni trošak rada za probnu seriju.

$$C_{rPS} = 0,087 \cdot 100 = 8,7 \text{ kn}$$

Proizvodna cijena jednog otpreska  $C_{OPS}$ :

$$C_{OPS} = C_{mO} + C_{sO} + C_{rO} \quad (7.17)$$

gdje je  $C_{OPS}$  proizvodna cijena jednog otpreska.

$$C_{OPS} = 6,99 + 2,67 + 0,087 = 9,75 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

## 7.6. Troškovi proizvodnje

Cijena materijala za proizvodnu seriju  $C_{mPS}$ :

- ukupna jedinična cijena materijala  $C_m$ :

$$C_m = \frac{C_{om} + U_b \cdot C_b + U_r \cdot C_r}{1 + U_b + U_r}$$

$$C_m = \frac{12,5 + 0,1 \cdot 40 + 0 \cdot 0,2}{1 + 0,1 + 0} = 15 \text{ kn}$$

- stvarni jedinični utrošak materijala:

$$A_m = \frac{m_g - m_{us} \cdot S_{pp}}{x_k}$$

$$A_m = \frac{0,409 - 0 \cdot 0}{1} = 0,409 \text{ kg}$$

- stvarni jedinični gubici materijala zbog škarta:

$$B = m_o \cdot S_u \cdot (1 - S_{up})$$

$$B = 0,409 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0) = 0,057 \text{ kg}$$

- cijena materijala za proizvodnu seriju:

$$C_{mO} = C_m \cdot (A_m + B + C)$$

$$C_{mO} = 15 \cdot (0,409 + 0,057 + 0) = 6,99 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

$$C_{mPS} = C_{mO} \cdot n_{serPS}$$

$$C_{mPS} = 6,99 \cdot 10000 = 69\,900 \text{ Kn}$$

Cijena ubrizgavalice za proizvodnu seriju  $C_{sPRS}$ :

$$C_{sO} = \left( \frac{t_c}{x_k \cdot \mu_p} + \frac{t_{pz} + G_{or}}{n_{serPS}} \right) \cdot C_u$$

$$C_{sO} = \left( \frac{0,003}{1 \cdot 0,86} + \frac{3 + 1,5}{100} \right) \cdot 55 = 2,67 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

$$C_{sPRS} = C_{sO} \cdot n_{serPS}$$

$$C_{sPRS} = 2,67 \cdot 10000 = 26700 \text{ kn}$$

Cijena rada za proizvodnu seriju:

$$C_{rO} = \left( \frac{t_c}{x_k \cdot \mu_p} \right) \cdot C_{ra} \cdot n_r$$

$$C_{rO} = \left( \frac{0,003}{1 \cdot 0,86} \right) \cdot 25 \cdot 1 = 0,087 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

$$C_{rPS} = C_{rO} \cdot n_{\text{serPS}}$$

$$C_{rPS} = 0,087 \cdot 10000 = 870 \text{ kn}$$

Proizvodna cijena jednog otpreska  $C_{OPS}$ :

$$C_{OPS} = C_{mO} + C_{sO} + C_{rO}$$

$$C_{OPS} = 6,99 + 2,67 + 0,087 = 9,75 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

## 7.7. Prosječna cijena otpreska probne (nulte) i proizvodne serije

Prosječna cijena otpreska probne (nulte) i proizvodne serije:

$$C_{\text{PRO}} = \frac{\frac{n_{\text{serPS}}}{C_{OPS}} + \frac{n_{\text{ser}}}{C_{OPS}}}{\frac{n_{\text{serPS}}}{C_{OPS}} + \frac{n_{\text{ser}}}{C_{OPS}}} \quad (7.18)$$

gdje je  $C_{\text{PRO}}$  prosječna cijena otpreska.

$$C_{\text{PRO}} = \frac{\frac{100 + 10000}{9,75}}{\frac{100}{9,75} + \frac{10000}{9,75}} = 9,75 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

## 7.8. Troškovi održavanja za jedan otpresak

Troškovi održavanja za jedan otpresak  $C_{0\text{serO}}$ :

$$C_{0\text{serO}} = \frac{T_{0\text{ser}}}{n_{\text{ser}}} \quad (7.19)$$

gdje je  $C_{0\text{serO}}$  trošak održavanja za jedan otpresak.

$$C_{0\text{serO}} = \frac{4000}{10000} = 0,4 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

### 7.9. Konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku

Konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku:

$$C_o = \frac{T_{\text{KON}} + T_{\text{K}} + T_{\text{KS}}}{n_{\text{uk}}} + C_{\text{0serO}} + C_{\text{PRO}} \quad (7.20)$$

gdje je  $C_o$  konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku.

$$C_o = \frac{36000 + 74000 + 6834,75}{1000000} + 0,4 + 9,75 = 10,27 \frac{\text{kn}}{\text{kom}}$$

## 8. ZAKLJUČAK

Postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode je vrlo osjetljiv na iznose parametara preradbe, zbog dodira kapljevine i polimerne taljevine. Na mjestu dodira dolazi do hlađenja polimerne taljevine, što otežava napredovanje šupljine. Postupak je pogodan za izradbu otpresaka svih veličina koji imaju šuplju sredinu. Kod proizvoda manjih dimenzija je potreban veći tlak vode i stroga kontrola parametara preradbe, dok je kod proizvoda većih dimenzija potreban manji tlak vode i blaža kontrola parametara preradbe. Pronalazak optimalnih parametara preradbe je težak, jer je proces vrlo teško matematički opisati. Budući da je postupak injekcijskog prešanja s pomoću vode novi postupak i zbog nedostatka literaturnih opisa dobivanja složenih proizvoda, potrebno je provesti pokuse na probnim uzorcima prije konačne konstrukcije kalupa.

Simulacija naprezanja i deformacija koja je provedena u programskom paketu CATIA na modelu crijepa kolektora je pokazala da iznosi naprezanja i deformacija kojima je proizvod podvrgnut na mjestu ugradnje nisu kritično veliki. Crijep kolektor ima iste dimenzije kao i glineni crijep, što omogućava jednostavnu montažu i uklapanje s glinenim crijepovima na krovu. Za materijal je odabran polipropilen s 30 % staklenih vlakana zbog malog koeficijenta toplinskog širenja, zbog odličnih mehaničkih svojstava i relativno niske cijene koštanja. Ovaj materijal je moguće upotrebljavati u postupku injekcijskog prešanja s pomoću vode, ali uz vrlo strogu regulaciju procesnih parametara.

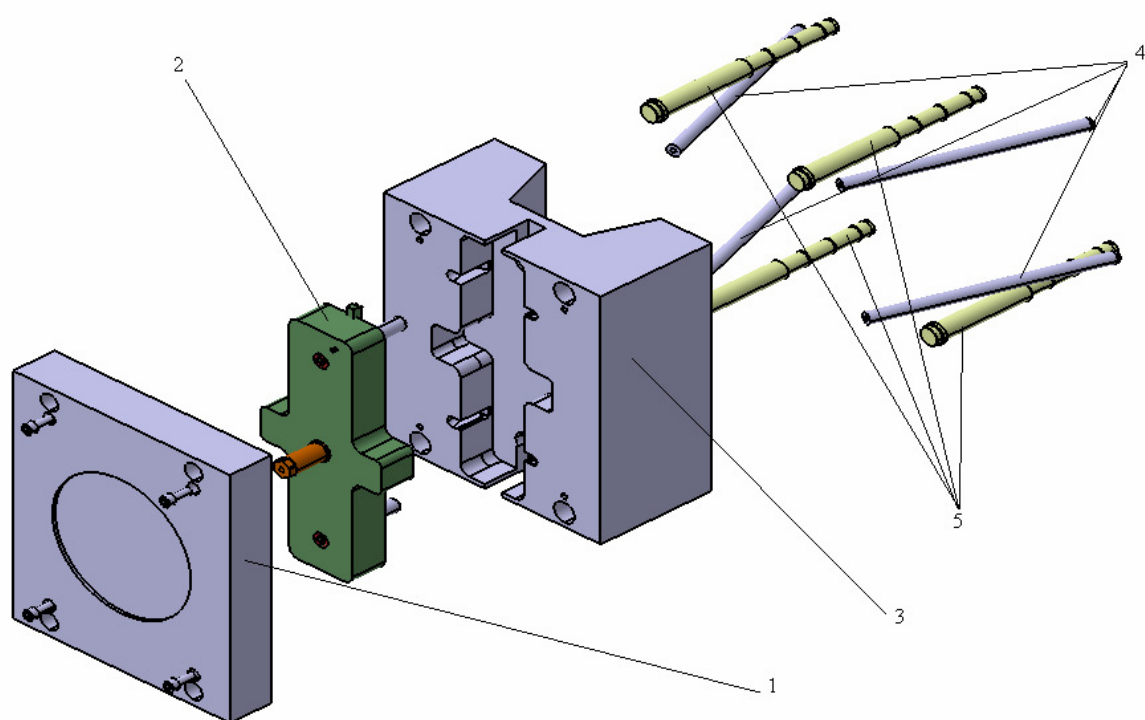
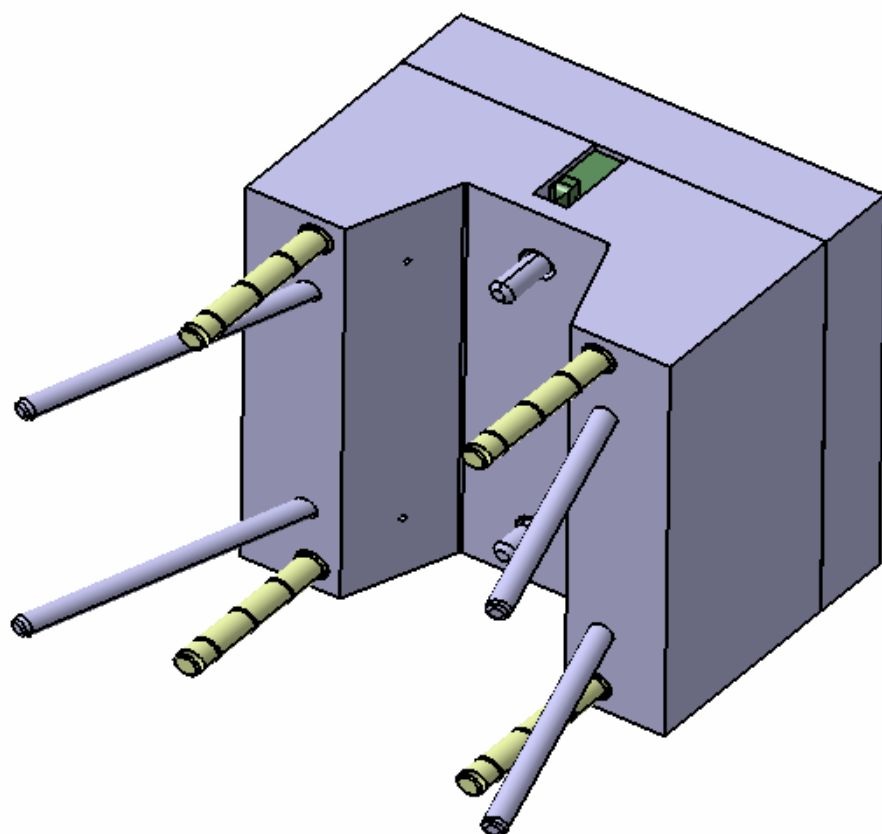


## 9. POPIS LITERATURE

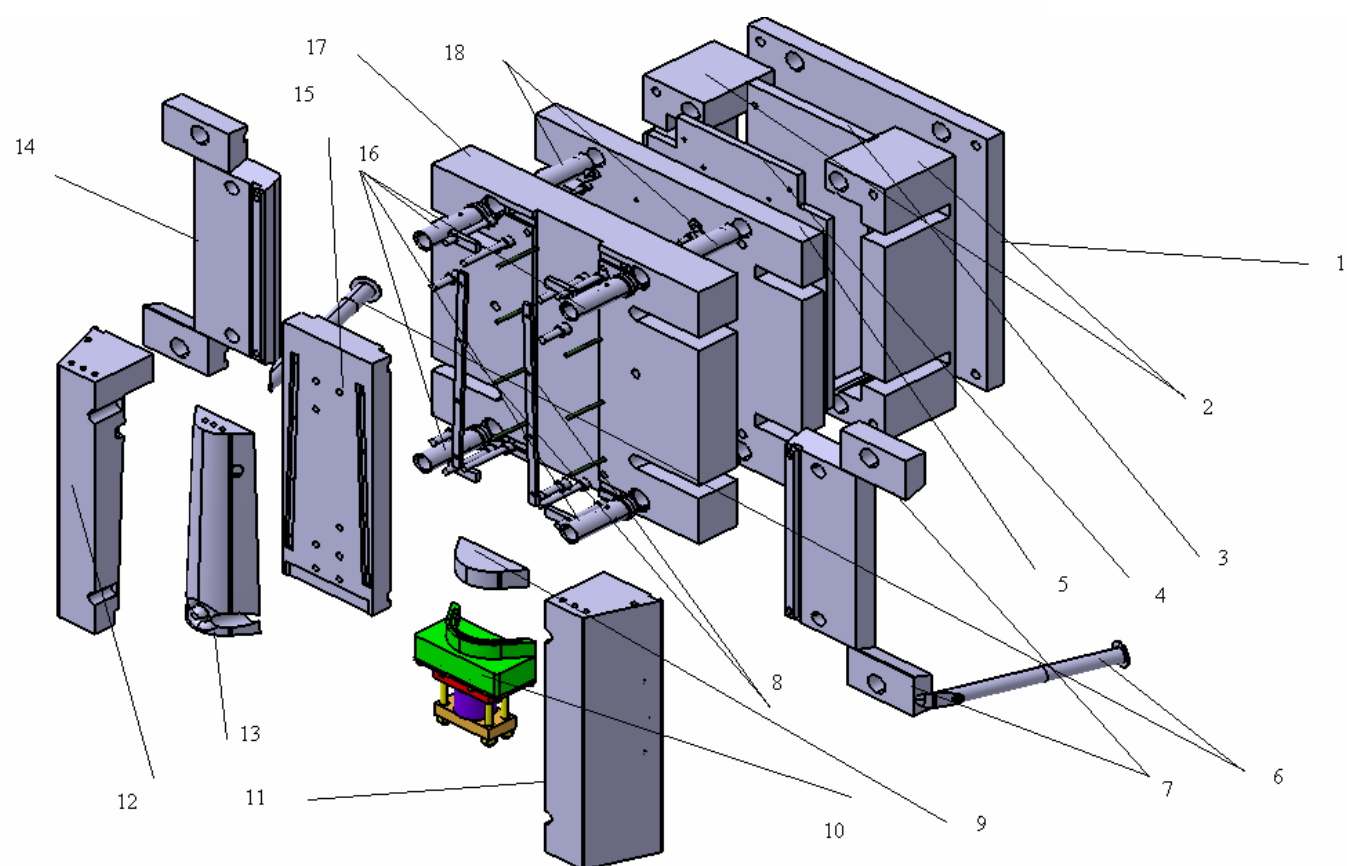
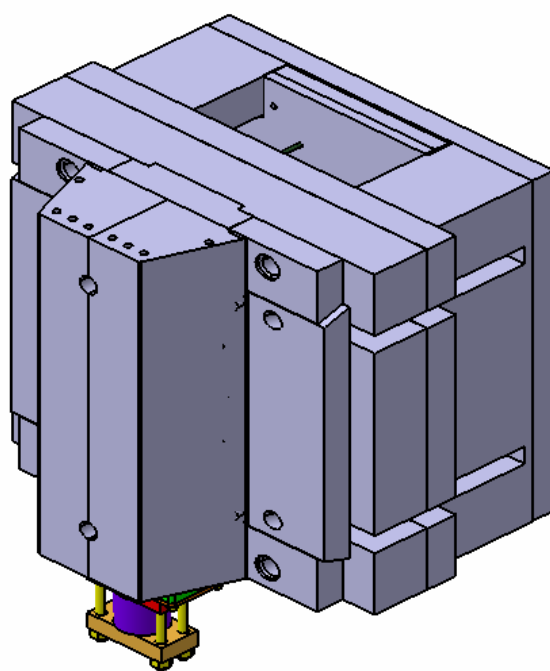
1. Michaeli W., Jüntgen T., Grönlund O., Koning E., Lettowsky C.: *Spritzgießsonderverfahren I*, Institut für kunststoffverarbeitung, Aachen Deutschland, 2004.
2. <http://www.bayerone.com/> 13.1.2008.
3. N. N.: *Special injection technologies*, Pôle Européen de Plasturgie, Bellignat France, 2003.
4. Shih-Jung, Liu, Yen-Shou, Chen: *The manufacturing of thermoplastic composite parts by water-assisted injection-molding technology*, Polymer Rheology and Processing Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Chang Gung University, Taiwan, 2003.
5. Shih-Jung, Liu, Yen-Shou, Chen: *Study of 'fingering' in water assisted injection molded composites*, Polymer Rheology and Processing Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Chang Gung University, Taiwan, 2005.
6. E. Oberšmit: *Osnove konstruiranja*, Sveučilišna naklada, Zagreb, 1991.
7. R. A. Malloy: *Plastic part design for injection molding*, Carl Hanser Verlag, München, 1994.
8. A. Galović: *Termodinamika II*, Denona, Zagreb 2003.
9. P. Raos, I. Čatić: *Razvoj injekcijski prešanih polimernih tvorevina*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1992.
10. [www.borealisgroup.com/datasheets/](http://www.borealisgroup.com/datasheets/) 10.3.2008.
11. Catia V5 help
12. [www.rapid-prototyping.harnest-tech.com](http://www.rapid-prototyping.harnest-tech.com) 11.3.2008.
13. [www.2objet.com](http://www.2objet.com) 12.1.2008.

## **10. PRILOG**

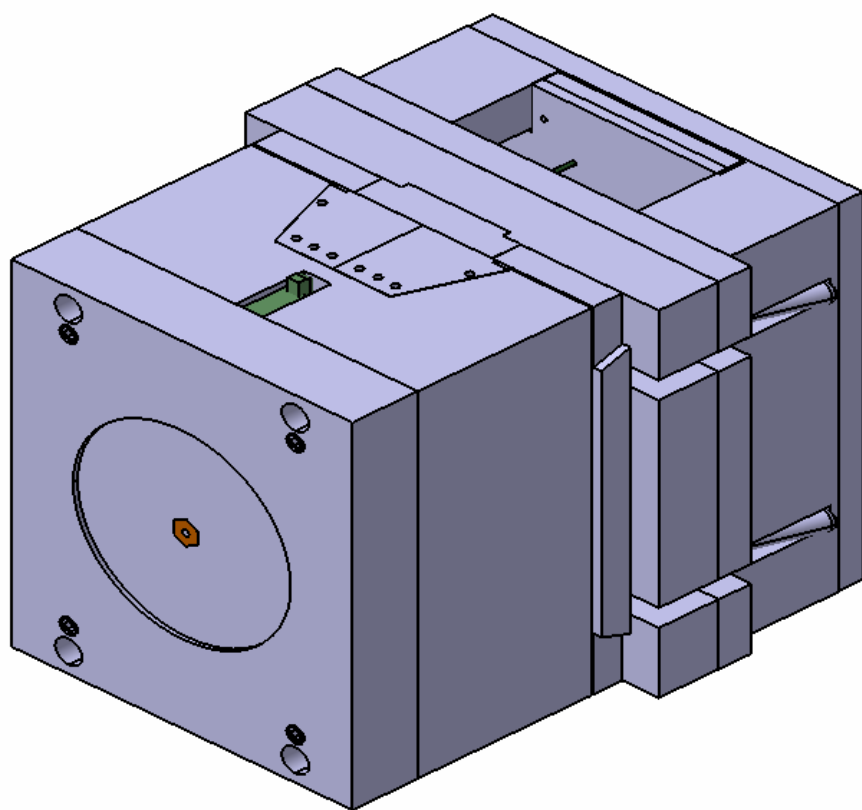
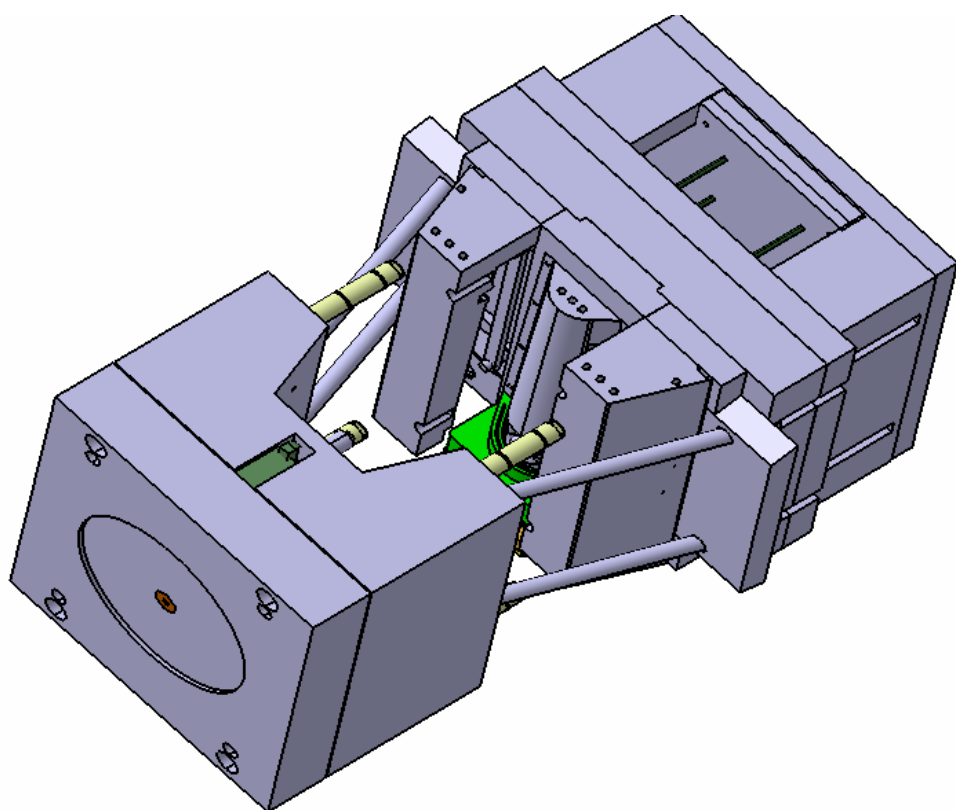
1. Vizualni prikaz kalupa za injekcijsko prešanje s pomočjo vode
2. Vizualni prikaz ventila za vodu

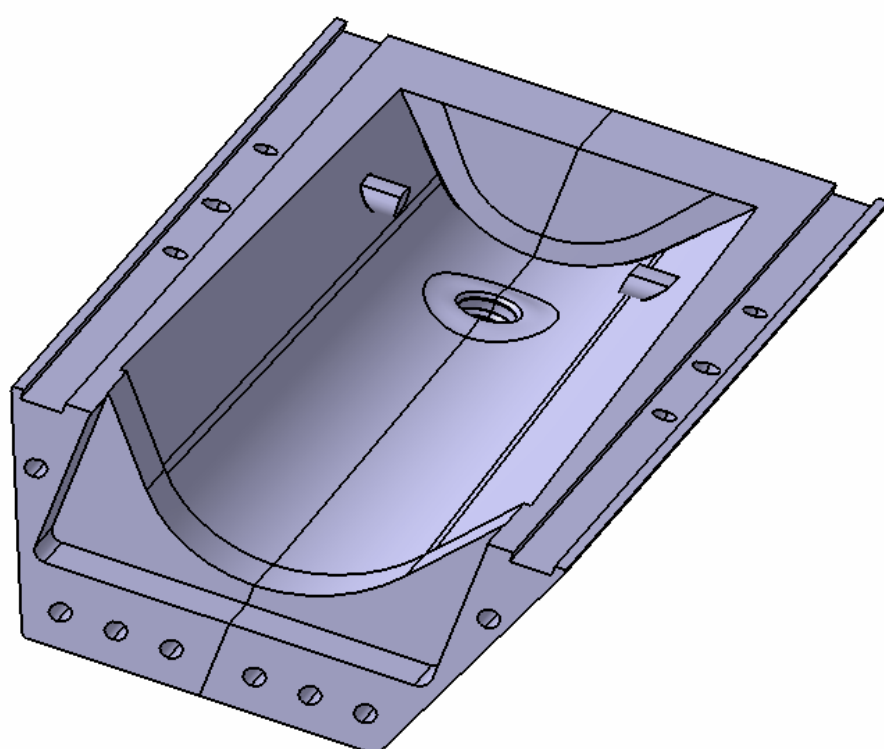
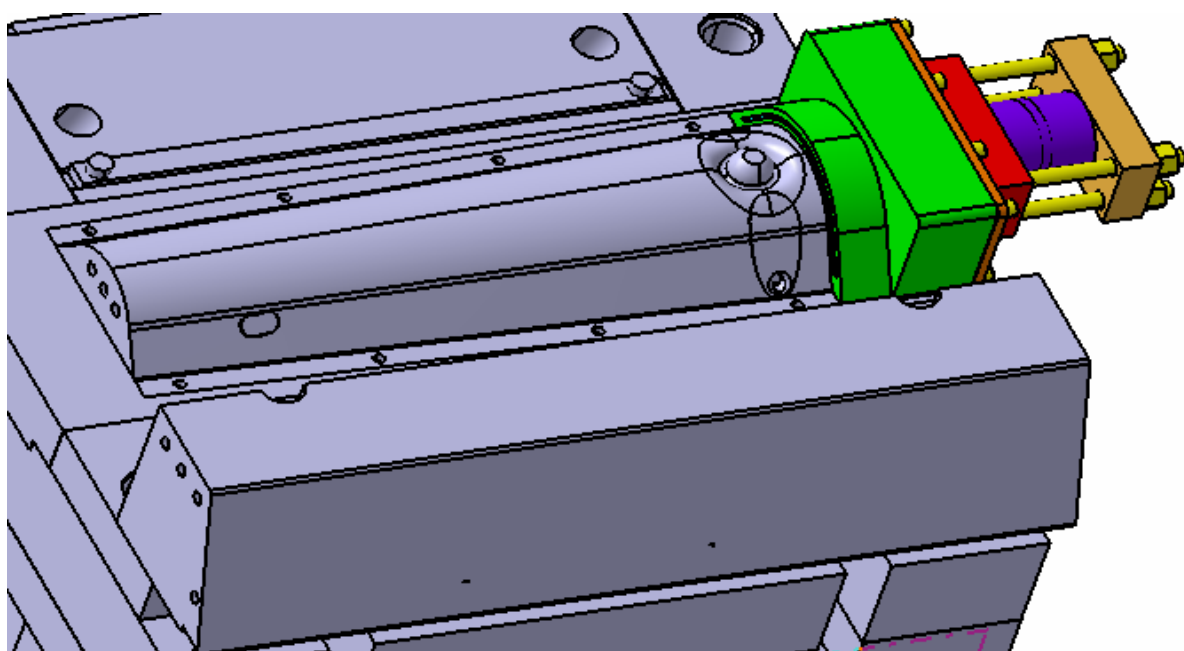


| <b>Pozicija</b> | <b>Količina</b> | <b>Naziv pozicije</b> | <b>Dimenzije</b> |
|-----------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| 1               | 1               | Prva ploča kalupa     | 376 x 446 x 72   |
| 2               | 1               | Vrući uljevni sustav  | HASCO            |
| 3               | 1               | Druga ploča kalupa    | 376 x 446 x 192  |
| 4               | 4               | Vodilice čeljusti     | Φ20 x 320        |
| 5               | 4               | Vodilice alata        | Φ20 x 350        |

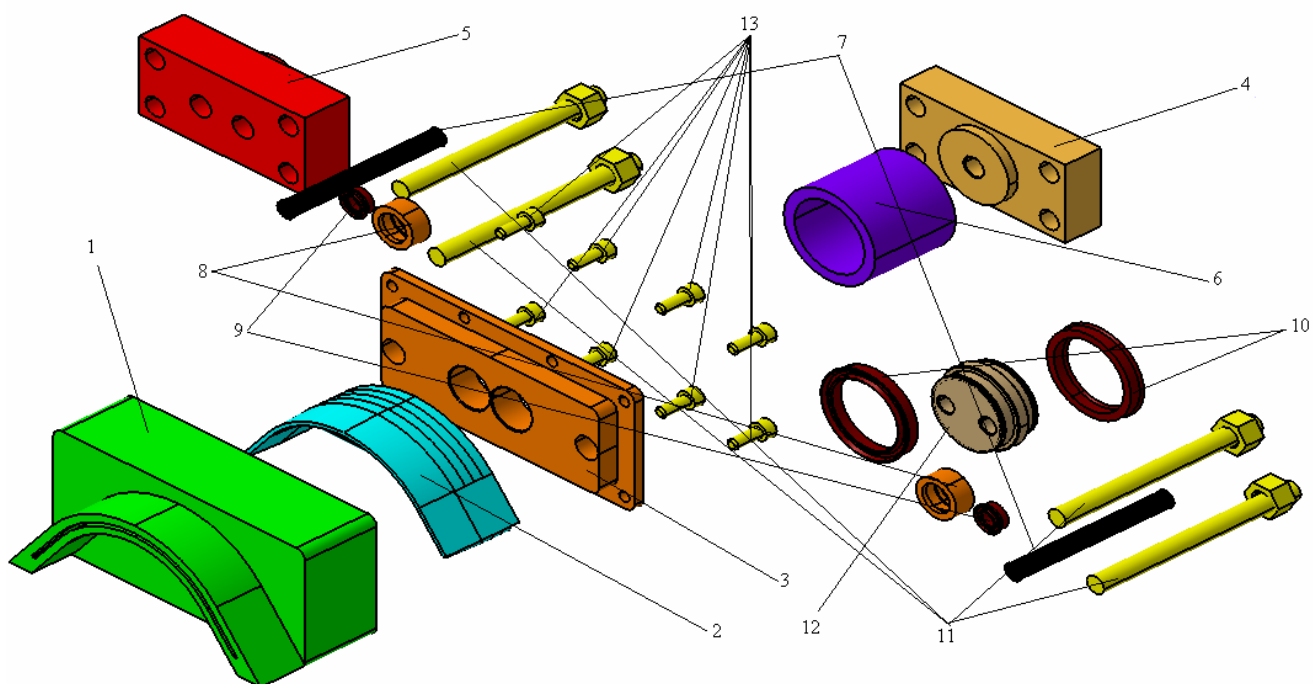
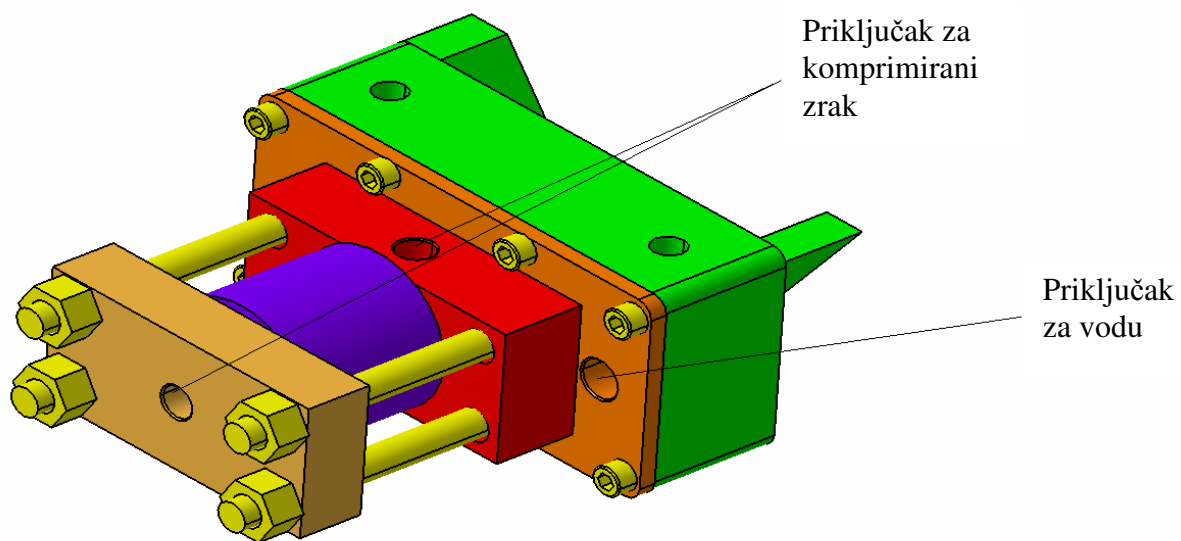


| <b>Pozicija</b> | <b>Količina</b> | <b>Naziv pozicije</b>      | <b>Dimenzije</b>   |
|-----------------|-----------------|----------------------------|--------------------|
| 1               | 1               | Peta ploča alata           | 408 x 446 x 27     |
| 2               | 2               | Distantna ploča izbacivala | 103 x 446 x 120    |
| 3               | 1               | Prva ploča izbacivala      | 204 x 446 x 17     |
| 4               | 1               | Druga ploča izbacivala     | 308 x 446 x 12     |
| 5               | 1               | Četvrta ploča alata        | 456 x 446 x 36     |
| 6               | 2               | Klizači za utor            | Φ25 x 273          |
| 7               | 4               | Vodilice čeljusti          | 69 x 112 x 32      |
| 8               | 2               | Izbacivala                 | 10 x 320 x 10      |
| 9               | 1               | Naslon ventila             | 48 x 117,3 x 25    |
| 10              | 1               | Ventil                     | 160 x 143,3 x 70   |
| 11              | 1               | Desna čeljust              | 100 x 100 x 446    |
| 12              | 1               | Lijeva čeljust             | 100 x 100 x 446    |
| 13              | 1               | Donji dio proizvoda        | 48x 117,3 x 349,8  |
| 14              | 2               | Klizač čeljusti            | 120,5 x 329,6 x 32 |
| 15              | 1               | Nosač kalupne šupljine     | 40 x 152,1 x 446   |
| 16              | 4               | Kuglična puškica           | Φ30 x 80           |
| 17              | 1               | Treća ploča alata          | 456 x 446 x 56     |
| 18              | 4               | Puškica za centriranje     | Φ32 x 80           |









| <b>Pozicija</b> | <b>Količina</b> | <b>Naziv pozicije</b>   | <b>Dimenzije</b>      |
|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| 1               | 1               | Tijelo ventila          | 143 x 70 x 65         |
| 2               | 1               | Klapna ventila          | 120 x 40 x 43         |
| 3               | 1               | Prihvatna ploča ventila | 143 x 70 x 15         |
| 4               | 1               | Stražnja ploča ventila  | 94 x 46 x 20          |
| 5               | 1               | Prednja ploča cilindra  | 94 x 46 x 25          |
| 6               | 1               | Tijelo cilindra         | Φ22 x 54              |
| 7               | 2               | Stap cilindra           | Φ10 x 60              |
| 8               | 2               | Držać brtve             | Φ16 x 10              |
| 9               | 2               | Brtva                   | TTS 504 – 10-16-4,8/L |
| 10              | 2               | Brtva                   | TTS 614/1 – 40-48-6/L |
| 11              | 4               | Vijčana šipka M10       | M10 x 75              |
| 12              | 1               | Klizač cilindra         | Φ 55 x 20             |
| 13              | 8               | Vijak M6 x 25           | DIN 912               |